

Universidad de Pinar del Río “Hermanos Saíz Montes de Oca”
Facultad Forestal y Agronomía
Centro de Estudios Forestales

**Termoconversión del aserrín de *Acacia mangium* Willd en biocarbón para
acondicionador de sustratos en la producción de plántulas de *Talipariti elatum*
(Sw.) Fryxell**

Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Forestales

YASIEL ARTEAGA CRESPO

Pinar del Río, Cuba
2013

Universidad de Pinar del Río “Hermanos Saíz Montes de Oca”

Facultad Forestal y Agronomía

Centro de Estudios Forestales

**Termoconversión del aserrín de *Acacia mangium* Willd en biocarbón para
acondicionador de sustratos en la producción de plántulas de *Talipariti elatum*
(Sw.) Fryxell**

Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Forestales

Autor: MSc. Yasiel Arteaga Crespo

Tutores: Dra. C. Prof. Tit. Leila Rosa Carballo Abreu

Dra. C. Prof. Tit. Gretel Geada López

Pinar del Río, Cuba
2013

AGRADECIMIENTOS

Son muchas las personas e Instituciones que me apoyaron y ayudaron a alcanzar estos resultados. Le agradezco en especial a:

Universidad de Pinar del Río, Cuba, y a la Universidad de Campinas y de Visoça, Brasil.

CAPES, CNPq, así como al Laboratorio Provincial de Suelos del MINAG en Pinar del Río, Cuba.

Un agradecimiento muy especial a mis tutoras, por sus sabias contribuciones, comentarios y sugerencias.

A todos mis compañeros (as) y amigos (as) que de una u otra manera estuvieron conmigo, dándome consejos, experiencias y ánimos para seguir con este propósito.

A mi familia que siempre me ha apoyado.

A todos muchas gracias.

SÍNTESIS

La termoconversión del aserrín de *Acacia mangium* Willd resultó en un material carbonoso (biocarbón) donde los mayores rendimientos se presentaron a una temperatura de 270 °C con una velocidad de calentamiento de 5 °C min⁻¹. El biocarbón presentó propiedades de adsorción y absorción dado a la presencia de grupos funcionales cargados negativamente en la superficie y su estructura porosa, con un alto contenido de materia orgánica y retención de humedad y baja densidad, lo que permitió su utilización como componente activo de los sustratos, mejorando las propiedades químicas y físicas para la producción de plantas forestales en contenedores. La especie *Talipariti elatum* (Sw.) Fryxell mostró una respuesta hídrica con desarrollo de mecanismos de ajuste osmótico y elástico en el período evaluado. Los parámetros morfológicos más favorables resultaron en los sustratos conformados por cachaza con un veinte y cincuenta por ciento de biocarbón (C80 y C50), lo que evidenció que estos sustratos proporcionan las mejores características químicas y físicas requeridas para su crecimiento, con aportes nutricionales en la mayor parte del período evaluado.

ÍNDICE

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. CARACTERIZACIÓN QUÍMICO-FÍSICA DEL ASERRÍN DE	5
<i>A. mangium</i>	
1.1 INTRODUCCIÓN	5
1.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	7
1.2.1 Composición química de los materiales lignocelulósicos	7
1.2.2 Métodos para la caracterización química de los materiales lignocelulósicos	10
1.2.3 Termoconversión de lignocelulósicos. Pirólisis	12
1. 3 MATERIALES Y MÉTODOS	16
1.3.1 Selección de la muestra	16
1.3.2 Preparación de la muestra de madera para el análisis composicional	16
1.3.3 Procedimiento para el análisis elemental e inmediato del aserrín de <i>A. mangium</i>	16
1.3.4 Determinación de la composición química del aserrín de <i>A. mangium</i>	17
1.3.5 Identificación de grupos funcionales del aserrín de <i>A. mangium</i>	18
1.3.6 Determinación de parámetros termogravimétricos de <i>A. mangium</i>	18
1.3.7 Determinación de parámetros cinéticos de <i>A. mangium</i>	18
1.3.8 Diseño de experimento	20
1.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
1.4.1 Análisis elemental e inmediato del aserrín de <i>A. mangium</i>	21
1.4.2 Composición química del aserrín de <i>A. mangium</i>	21
1.4.3 Grupos funcionales del aserrín identificados por espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier	22
1.4.4 Análisis termogravimétrico del aserrín de <i>A. mangium</i>	23
1.4.5 Parámetros cinéticos	25
1.4.6 Análisis de la influencia de la temperatura y velocidad de calentamiento en los rendimientos de biocarbón	26

CONCLUSIONES PARCIALES	28
CAPÍTULO II. PROPIEDADES QUÍMICAS Y FÍSICAS DEL BIOCARBÓN Y DE LOS SUSTRATOS EN MEZCLAS CON BIOCARBÓN	29
2.1 INTRODUCCIÓN	29
2.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	31
2.2.1 Biocarbón y sus propiedades	31
2.2.2 Los sustratos en la producción de plántulas forestales en tubetes	32
2.2.3 Características físicas y químicas de los sustratos	33
2.3 MATERIALES Y MÉTODOS	36
2.3.1 Caracterización del biocarbón de <i>A. mangium</i>	36
2.3.2 Sustratos empleados y tipo de envase	37
2.3.3 Determinación de las propiedades de los sustratos	38
2.3.4 Destubetado, estabilidad del cepellón y arquitectura radical	39
2.3.5 Procesamiento estadístico	39
2.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
2.4.1 Porosidad, área superficial específica y funcionalidades	40
2.4.2 Morfología del biocarbón	40
2.4.3 Análisis espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier	42
2.4.4 Caracterización química de los sustratos en mezclas con biocarbón	43
2.4.5 Caracterización física de los sustratos	45
2.4.6 Análisis de las propiedades relativas al destubetado, la estabilidad del cepellón y la arquitectura radical	49
CONCLUSIONES PARCIALES	53

**CAPÍTULO III. EFECTO DEL BIOCARBÓN COMO ACONDICIONADOR
DE SUSTRATOS A TRAVÉS DE PARÁMETROS
MORFOFISIOLÓGICOS DE PLÁNTULAS DE *Talipariti elatum* (Sw.) Fryxell 54**

3.1 INTRODUCCIÓN	54
3.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	56
3.2.1 Atributos morfológicos	56
3.2.2 Atributos fisiológicos	57
3.2.2.1 Relaciones hídricas	57
3.2.3 Métodos para medir el estado hídrico de las plantas	58
3.2.4 Nutrición mineral	60
3.2.4.1 Uso de vectores para diagnóstico nutricional	61
3.3 MATERIALES Y MÉTODOS	63
3.3.1 Ubicación del experimento	63
3.3.2 Procedencia, almacenamiento y características del material de reproducción	63
3.3.3 Tratamiento pregerminativo y siembra	63
3.3.4 Evaluación de la dinámica de crecimiento de <i>T. elatum</i>	63
3.3.5 Medición de variables morfológicas	64
3.3.6 Índices y relaciones morfológicas	64
3.3.7 Determinación de variables fisiológicas	65
3.3.8 Procesamiento estadístico	68
3.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	69
3.4.1 Dinámica de crecimiento en altura y diámetro	69
3.4.2 Análisis de las variables e índices morfológicos	70
3.4.3 Análisis discriminante para los sustratos empleados en la producción de <i>T. elatum</i>	74
3.4.4 Atributos fisiológicos	77
3.4.4.1 Comportamiento de los parámetros hídricos	77
3.4.5 Análisis nutricional	84

3.5 Análisis económico por concepto de sustitución de sustrato	88
CONCLUSIONES PARCIALES	92
CONCLUSIONES GENERALES	93
RECOMENDACIONES	94
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Análisis elemental e inmediato del aserrín de <i>A. mangium</i>	21
Tabla 2. Composición química del aserrín de <i>A. mangium</i>	22
Tabla 3. Parámetros cinéticos de la pirólisis del aserrín de <i>A. mangium</i>	26
Tabla 4. Factor de contribución en porcentaje de cada componente y el porcentaje de ajuste entre las curvas experimental y calculada para cada velocidad de calentamiento	26
Tabla 5. Composición de los sustratos empleados en el experimento	38
Tabla 6. Niveles establecidos para las variables destubetado, estabilidad del cepellón y arquitectura radical	39
Tabla 7. Propiedades físicas y funcionales del biocarbón	40
Tabla 8. Distribución de los poros del biocarbón	41
Tabla 9. Valores medios y desviación típica de la composición química de los sustratos utilizados	44
Tabla 10. Valores medios y desviación típica de las características físicas de los sustratos	45
Tabla 11. Matriz de correlación de Pearson para las variables físicas	48
Tabla 12. Resumen del análisis de correspondencia	49
Tabla 13. Valores medios y desviación típica de las variables morfológicas	71
Tabla 14. Valores medios y desviación típica de los índices morfológicos	72
Tabla 15. Estadísticos descriptivos del análisis discriminante	74
Tabla 16. Coeficientes estandarizados de las funciones discriminantes canónicas	74
Tabla 17. Resultado de la clasificación a partir de las funciones discriminantes	75
Tabla 18. Matriz de correlación entre los parámetros hídricos de la especie	83
Tabla 19. Matriz de correlación entre propiedades físicas de los sustratos y parámetros hídricos de la especie	84

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Estructura lineal de la cadena base de la celulosa	8
Figura 2. Estructura de O-acetilgalactoglucomanano	8
Figura 3. Unidades precursoras de las ligninas	9
Figura 4. Espectro infrarrojo con trasformada de Fourier del aserrín de <i>A. mangium</i>	23
Figura 5. Termodescomposición del aserrín de <i>A. mangium</i> para velocidades de calentamiento 5,10 y 15 °C min ⁻¹	24
Figura 6. Curva termogravimétrica de la pirólisis del aserrín de <i>A. mangium</i> a 10 °C min ⁻¹	25
Figura 7. Influencia de la temperatura y la velocidad de calentamiento en los rendimientos de biocarbón	27
Figura 8. Micrografía electrónica de barrido del biocarbón	41
Figura 9. Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier del aserrín de <i>A. mangium</i> y biocarbones a diferentes condiciones experimentales	42
Figura 10. Distribución del tamaño de las partículas en los sustratos estudiados	48
Figura 11. Representación en dos dimensiones de la relación entre los niveles del destubetado y los sustratos	50
Figura 12. Representación en dos dimensiones de la relación entre los niveles de estabilidad del cepellón y los sustratos	50
Figura 13. Representación en dos dimensiones de la relación entre los niveles de arquitectura radical y los sustratos	51
Figura 14. Desarrollo radical. (a) Buena, (b) Aceptable, (c) Mala	51
Figura 15. Curva presión–volumen utilizada para determinar los componentes del potencial hídrico	66
Figura 16. Dinámica de crecimiento de <i>T. elatum</i> en diferentes sustratos. (a) altura, (b) diámetro	69
Figura 17. Diagrama de dispersión de los nueve grupos (sustratos) en las dos funciones discriminantes	76

Figura 18. Potencial de soluto de <i>T. elatum</i> a máxima turgencia en diferentes tiempos para cada uno de los sustratos empleados	78
Figura 19. Potencial de soluto de <i>T. elatum</i> a cero turgencia en diferentes tiempos para cada uno de los sustratos empleados	79
Figura 20. Módulo de elasticidad de la pared celular de <i>T. elatum</i> en diferentes tiempos para cada uno de los sustratos empleados	80
Figura 21. Contenido hídrico relativo en el punto de pérdida de la turgencia de <i>T. elatum</i> en diferentes tiempos para cada uno de los sustratos empleados	82
Figura 22. Nomograma vectorial para el análisis de nitrógeno foliar	86
Figura 23. Nomograma vectorial para el análisis de fósforo foliar	87
Figura 24. Nomograma vectorial para el análisis de potasio foliar	88
Figura 25. Esquema del diseño del horno de pirólisis	89

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

La política forestal de Cuba contempla en su programa de desarrollo hasta el año 2020 la sustitución en más de un 90 % de la tecnología de vivero forestal tradicional por la de tubetes para producción de plantas (SEF, 2012). Esto hace necesario el empleo de sustratos orgánicos que reúnan propiedades químicas y físicas que garanticen aportes de nutrientes necesarios en un volumen limitado de 90-120 cm³, así como una fácil operabilidad.

El propósito de cualquier lote de planta cultivado en vivero y destinado a repoblación es superar satisfactoriamente la fase de establecimiento y de ahí la importancia de lograr plantas capaces de recuperarse rápidamente del posible estrés sufrido durante su traslado y plantación ya que debe retomar las funciones vitales de absorción de agua y nutrientes en el nuevo ambiente (Margolis y Brand, 1990). En la medida en que se obtengan plantas con mecanismos fisiológicos que le permitan un buen desarrollo se garantizará un mayor éxito de logro en la plantación.

En los últimos años el uso de materiales con características capaces de sustituir al suelo en la producción de plantas forestales ha ido creciendo, de tal manera se proyecta que la producción en viveros sea bajo esquemas donde se utilicen materiales reciclables y con orientación ecológica (Santiago, 2002), lo que representa un reto para el sector forestal.

Por otro lado, el sector forestal cubano se enfrenta al desafío de manejar los residuales lignocelulósicos que se obtienen del proceso de elaboración primaria de la madera, los cuales constituyen un problema ambiental que requiere de especial atención, por lo que la búsqueda de alternativas para su utilización resulta de urgente interés, además de

incrementar el valor agregado del recurso forestal, y así generar mayores beneficios económicos (Arteaga *et al.*, 2012).

Entre las alternativas de manejo, la termoconversión pudiera ser una variante a considerar, mediante esta el aserrín es transformado en biocarbón, convirtiendo un desecho en un producto capaz de mejorar algunas propiedades químicas y físicas de sustratos orgánicos para la producción de plántulas.

El biocarbón se obtiene de materiales de origen orgánico, principalmente de residuos agrícolas y forestales, y ha sido ampliamente utilizado como acondicionador de terrenos agrícolas (Asai *et al.*, 2009; Sohi *et al.*, 2010; Zwieten *et al.*, 2010). La aplicación de biocarbón puede modificar las propiedades químicas y físicas de los suelos con un consecuente incremento de la capacidad de intercambio catiónico debido a la presencia de grupos orgánicos cargados en su estructura, aumento del pH, retención de humedad, movimiento de agua, lo que ejerce efectos positivos sobre el rendimiento y calidad de los cultivos (Oguntunde *et al.*, 2004; Liang *et al.*, 2006; Oguntunde *et al.*, 2008; Asai *et al.*, 2009; Zwieten *et al.*, 2010).

Por estas razones es de marcada importancia el estudio de las características de los de los sustratos simples o sus mezclas, de ahí que se identifica el siguiente **problema** de investigación ¿Cómo influye el biocarbón en las características físico-químicas de los sustratos para la producción de la especie *Talipariti elatum* (Sw.) Fryxell?, siendo el **objeto de estudio** el biocarbón de *Acacia mangium* Willd. La **hipótesis** a comprobar es: el biocarbón obtenido por termoconversión de aserrín de *A. mangium* es un acondicionador de las propiedades químicas y físicas de los sustratos requeridas para la producción de plántulas en viveros forestales.

Teniendo como **objetivo general**: Evaluar el efecto del biocarbón de *A. mangium* como acondicionador de sustratos para la producción de plántulas de *Talipariti elatum* (Sw.) Fryxell.

Y como **objetivos específicos**:

- Caracterizar la composición química-física del aserrín de *A. mangium* y su transformación térmica.
- Determinar las propiedades químicas y físicas del biocarbón y de los sustratos en mezclas con biocarbón.
- Evaluar el efecto del biocarbón como acondicionador sustratos a través de parámetros morfo-fisiológicos de *T. elatum*.

La **novedad científica** se sustenta en el empleo del biocarbón como acondicionador de sustratos para los viveros forestales, el empleo de nomogramas vectoriales para la evaluación del aporte nutricional de los sustratos a plantas de *T. elatum* cultivada en tecnología de tubetes.

Como **aporte teórico**, se presenta la composición química del aserrín de *A. mangium* y parámetros cinéticos del proceso de termoconversión, además las propiedades químicas, físicas y morfológicas del biocarbón, y el **aporte práctico** los viveros forestales podrán contar con un producto acondicionador de sustratos que proporcionará propiedades químicas y físicas requeridas para la producción de plántulas.

Para el logro de los resultados la tesis doctoral se ha estructurado en tres capítulos:

Capítulo I. Caracterización de la composición química-física del aserrín de *A. mangium* y su transformación térmica.

Capítulo II. Propiedades químicas y físicas del biocarbón y los sustratos en mezclas con biocarbón.

Capítulo III. Efecto del biocarbón como acondicionador de sustratos a través de parámetros morfo-fisiológicos de plántulas de *T. elatum*.

CAPÍTULO I

CAPÍTULO I

CARACTERIZACIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA-FÍSICA DEL ASERRÍN DE *A. Mangium* Y SU TRANSFORMACIÓN TÉRMICA

1.1 INTRODUCCIÓN

La estructura y composición química de los materiales lignocelulósicos influyen en sus propiedades, por lo que su estudio tiene un papel importante para la aplicabilidad. Las alteraciones tanto de la estructura macroscópica como de la composición química están asociados fundamentalmente a factores tales como la especie y la edad (Raymond, 2002; Wimmer *et al.*, 2002).

En los últimos años los métodos instrumentales de análisis tales como la espectroscopía infrarroja, microscopia de barrido electrónico, cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masa, entre otros, están cobrando gran importancia en los estudios de la caracterización de la estructura y composición química de la madera (El Hage *et al.*, 2009). Sin embargo, la existencia de estos no limita el empleo de métodos clásicos que aún aportan información valiosa e insustituible sobre su cuantificación.

En Cuba el aserrín (material lignocelulósico) constituye una problemática medioambiental (Martínez *et al.*, 2012 a, b), por lo que la búsqueda de alternativas de usos de este residual es una temática novedosa que contribuirá a su manejo y la obtención de beneficios económicos por este concepto. En esta dirección la termoconversión de residuos mediante la pirólisis ha sido propuesta como una alternativa de manejo, reduciendo el volumen contaminante (Caballero *et al.*, 1997; Koch y Kaminsky, 1993; Yamato *et al.*, 2006).

La provincia de Pinar del Río cuenta con una superficie total de 3 374,65 ha de plantaciones de *A. mangium* (SEF, 2012), las cuales mayoritariamente se destinarán para su aprovechamiento, lo que prevé a corto plazo un aumento de residuales lignocelulósicos generados a partir del proceso de elaboración primaria de la madera por lo que el presente capítulo presenta como objetivo: **Caracterizar la composición químico-física del aserrín de *A. mangium* y su transformación térmica.**

1.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.2.1 Composición química de los materiales lignocelulósicos

Los lignocelulósicos son materiales muy heterogéneos, constituidos fundamentalmente por biopolímeros: polisacáridos que incluyen la celulosa y las hemicelulosas, en proporciones que varían entre 65 y 75 %, y por ligninas, cuyas proporciones se encuentran entre 18 y 35 %. Además de estos compuestos estructurales existen otros que pueden ser removidos por procesos físicos, particularmente por extracción con diferentes disolventes (designados extractivos, que representan 1-6 %) y por una fracción inorgánica o cenizas, entre 0-2 % (Fengel y Wegener, 1984; Gullichsen y Paulapuro, 2000).

La proporción de estos componentes varía con la especie, entre la madera de árboles de la misma especie y en diferentes partes del propio árbol, en la madera de la albura y duramen y depende además, de la localización geográfica y de las condiciones edafoclimáticas (Fengel y Wegener, 1984).

Azúcares: La casi totalidad de los azúcares presentes en los lignocelulósicos se encuentran en forma de polisacáridos (celulosa y hemicelulosas). La celulosa es un polímero lineal de alta masa molar, el cual está constituido por unidades de β -D-glucosa, que se unen entre sí a través de los grupos hidroxilos del carbono uno y del cuatro (C_1 y C_4), con eliminación de una molécula de agua, dando lugar a la molécula de celobiosa que constituye la unidad estructural básica de la cadena de celulosa (Figura 1).

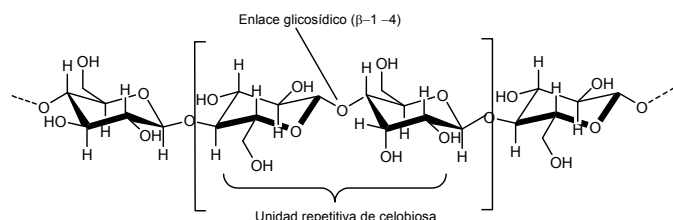


Figura 1. Estructura lineal de la cadena base de la celulosa (Fengel y Wegener, 1984; Gullichsen y Paulapuro, 2000)

En estado nativo, presenta un grado de polimerización promedio de 8 000 a 10 000 unidades de glucosa. Las moléculas de celulosa establecen puentes de hidrógeno intra e intermoleculares y se ordenan en forma de microfibrillas, apareciendo zonas de mayor ordenación (cristalinas), las cuales se alternan con otras menos ordenadas (amorfes). Como resultado de su estructura cristalina y de las uniones por puentes de hidrógeno, la molécula de celulosa tiene una elevada resistencia química y es insoluble en la mayoría de los disolventes, incluyendo las bases fuertes (Sjöström, 1981; Fengel y Wegener, 1984; Liu, 2010).

Las hemicelulosas son heteropolisacáridos de cadenas generalmente ramificadas. Sus constituyentes principales son hexosas (glucosa, manosa y galactosa) y pentosas (xilosa y arabinosa). Algunas hemicelulosas contienen, además, ácidos urónicos (Figura 2).

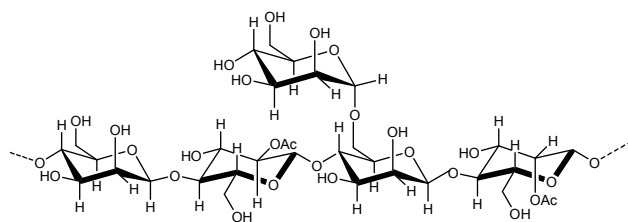


Figura 2. Estructura de O-acetilgalactoglucomanano (Fengel y Wegener, 1984; Gullichsen y Paulapuro, 2000)

Las hemicelulosas se encuentran en estrecha asociación con la celulosa y establecen también uniones con las ligninas. Sus cadenas moleculares son mucho más cortas que las de celulosa y presentan un grado de polimerización entre 50 y 300. De esta diferencia en la organización, resulta una estructura no cristalina en su estado nativo. Asimismo, presentan una mayor reactividad que la celulosa, siendo, por ejemplo, fácilmente hidrolizables en disolución alcalina (Fengel y Wegener, 1984; Theander, 1991).

Ligninas: Las ligninas son fracciones no carbohidratadas, extremadamente complejas y difíciles de caracterizar. Constituyen un polímero aromático, heterogéneo, ramificado, donde no existe ninguna unidad repetida definidamente. Las ligninas de la madera se clasifican en ligninas de coníferas y latifolias, las cuales difieren en su contenido de unidades precursoras: guayacilo (g), siringilo (s) y p-hidroxifenilo (h) (Fengel y Wegener, 1984; Pereira *et al.*, 2003) (Figura 3).

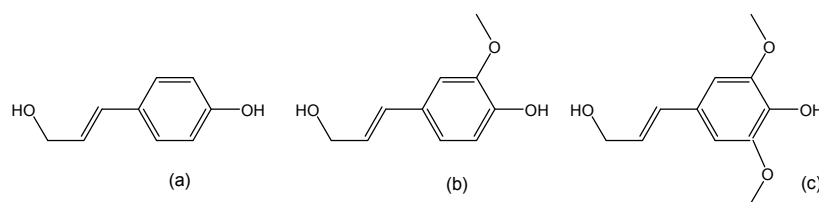


Figura 3. Unidades precursoras de las ligninas (Bierman, 1993). (a) alcohol p-cumarílico, (b) alcohol coniferílico, (c) alcohol sinapílico

Las ligninas no pueden ser descritas como una simple combinación de monómeros o tipos de cadenas. Son una sustancia amorfa, localizada como componente de la lámina media y también en la pared secundaria. Durante el desarrollo de la célula, la lignina se incorpora como último componente de la pared celular interpenetrando las fibrillas y fortaleciendo la pared celular. La separación de la lignina conlleva una degradación de

su estructura, por lo que resulta difícil obtener una lignina idéntica a la que se encuentra en la madera nativa (Fengel y Wegener, 1984; Pereira *et al.*, 2003).

Extraíbles: Los extraíbles no son considerados como integrantes de la parte estructural de la pared celular. Su composición y cantidad relativa dependen de diversos factores, como la especie, edad, región de procedencia, entre otros (Wallis y Wearne, 1997).

Aproximadamente de 3–10 % de la madera seca está constituida por extraíbles, generalmente para las maderas de coníferas se encuentra entre 5–8 % y para las latifolias, entre 2–4 %. Pueden ser clasificados en: materiales arrastrados con vapor de agua, sustancias solubles en disolventes orgánicos y solubles en agua. Los extraíbles son, frecuentemente, responsables por determinadas características de la madera, como color, olor, resistencia natural a la pudrición, el sabor, la inflamabilidad y las propiedades abrasivas (MacRae y Towers, 1984; Quinde y Paszner, 1992).

Desde el punto de vista de su naturaleza química, los extraíbles son terpenos, ácidos grasos, alcoholes alifáticos y aromáticos, compuestos fenólicos (taninos, flavonoides, lignanas, entre otros), mono y disacáridos entre otros (Sjöstrom, 1981).

1.2.2 Métodos para la caracterización química de los materiales lignocelulósicos

Para la caracterización química de los materiales lignocelulósicos se emplean tanto los métodos tradicionales (clásicos) como los instrumentales en función del grado de sensibilidad.

Métodos clásicos: Se utilizan para el estudio de la composición química de lignocelulósicos, las técnicas para la determinación de holocelulosa, celulosa, ligninas, extractivos, ceniza los cuales aparecen relacionados en las normas TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry), pero estos tienen como dificultad que suelen ser caros, destructivos y lentos. En la determinación de lignina el método

generalmente más utilizado es el Klason (TAPPI, 1998), que consiste en la hidrólisis ácida de los polisacáridos. Para la determinación de celulosa se utiliza frecuentemente el método de Kürshener y Höffer (Browning, 1967), mediante la disolución de las ligninas con ácido nítrico concentrado en etanol.

El método de extracción en Soxtec es una modificación de la extracción en Soxhlet. En el mismo, las muestras colocadas en dedales están en contacto directo con el líquido de extracción a temperatura de ebullición, durante 30 minutos (percolación). Después de esta fase, las muestras son suspendidas por encima del líquido y en contacto con el vapor, durante una hora (Rodrigues, 1998).

La lignina Klason también se denomina lignina insoluble en ácido. La determinación consiste en la realización de una hidrólisis ácida al material lignocelulósico, en dos etapas, de manera que sean disueltos los polisacáridos y el residuo insoluble en ácido es filtrado, lavado y pesado hasta masa constante.

Métodos instrumentales: Los métodos espectroscópicos de análisis están siendo muy utilizados en las investigaciones científicas. Se destacan en el estudio de la caracterización de la estructura y composición química de la madera, la espectroscopía ultra violeta, la espectroscopía infra roja con transformada de Fourier, la resonancia magnética nuclear y la espectroscopía de Raman con transformada de Fourier (Ona, 1997 y 1998; Galignani y Brunetto, 2004).

En la actualidad está siendo utilizada para la caracterización de diferentes maderas, la pirólisis analítica, técnica degradativa que consiste en la transformación de compuestos complejos en una mezcla de productos volátiles por degradación térmica en ausencia de oxígeno. La separación de aquellos productos de la pirólisis por cromatografía gaseosa y su identificación por espectrometría de masa permiten obtener información

estructural de los compuestos originales y el conocimiento de sus proporciones relativas. Este análisis ha sido encarado, esencialmente, desde el punto de vista cualitativo, para efectos comparativos de ligninas y para su clasificación (Rodrigues *et al.*, 1999).

Los métodos espectroscópicos se fundamentan en la interacción de las sustancias con la radiación electromagnética. La espectroscopía infrarroja comprende las frecuencias aproximadamente entre los 4 000 y 800 cm^{-1} . La absorción de la energía radiante puede ocasionar una transición vibracional, que corresponde a un aumento de la amplitud de la vibración de los átomos y de las moléculas entre sí. Todas las moléculas, o una porción de ellas, tienen vibraciones a longitudes de ondas características y todos los grupos funcionales, de los átomos de un mismo tipo, vibran en la molécula a la misma frecuencia. De la misma forma, todas las moléculas de la misma sustancia, vibran a la misma frecuencia en su estado fundamental (Skoog *et al.*, 1992).

1.2.3 Termoconversión de lignocelulósicos. Pirólisis

La pirólisis es un proceso complejo de degradación físico-química de la materia orgánica bajo la acción del calor y en ausencia de un medio oxidante. Los productos obtenidos son sólidos (carbón vegetal principalmente), líquidos pirolíticos y gases. Se encuentran otros términos para describir el mismo proceso; así, se emplea “carbonización” cuando se considera la obtención de carbón vegetal y líquidos condensables.

La teoría más ampliamente aceptada supone la descomposición del sólido a través de reacciones primarias, cuyos productos resultantes pueden degradarse al sufrir reacciones secundarias. Las proporciones y características de ambos productos (primarios y secundarios) son funciones de las condiciones bajo las cuales se ha

llevado el proceso. Cuando la pirólisis pretende optimizar la producción de carbón, esta se lleva a cabo lentamente con tiempo de reacciones de horas e incluso días. Si la reacción transcurre en tiempo no superior a pocos segundos se favorece el rendimiento en líquidos (Erçin y Yürüm, 2003). Varios son los parámetros que, en mayor o menor grado, influyen en la composición y rendimientos de los productos químicos resultantes y amplia es la bibliografía encontrada al respecto. La descomposición térmica de los materiales lignocelulósicos tiene lugar a través de una compleja serie de reacciones químicas unidas a procesos de transferencia de masa y calor, lo que hace que resulte muy difícil de establecer un mecanismo claro y conciso (García *et al.*, 1992).

De los tres componentes mayoritarios de los materiales lignocelulósicos: celulosa, ligninas y hemicelulosas, son estas últimas las más sensibles a la temperatura, descomponiéndose en el intervalo de 200 a 260 °C. Se ha propuesto que la degradación de esta macromolécula tiene lugar en dos etapas: eliminación de agua y fragmentos solubles, seguido por una conversión de los monómeros en volátiles (Browne, 1958). El xilano, es el componente mayoritario de las hemicelulosas en maderas duras y su pirólisis da lugar a un compuesto característico identificado por Ohnishi *et al.*, (1976) como 3- hidroxí-2-penteno-1,5-lactona (Evans y Milne, 1988 a y b), el manano forma la hemicelulosa principal de las maderas blandas (Shafizadeh, 1982). Con sus grupos acetilados, las hemicelulosas son fuente de ácido acético y de formaldehídos (Wenzl, 1970). Así Browne (1958), propuso que la ruptura de xilosa da lugar a la formación de dos unidades de ácido acético y una de formaldehído.

Son muchos los estudios realizados sobre el mecanismo de pirólisis de la celulosa. En oposición a las hemicelulosas, el componente celulósico es el mismo en todos los tipos de biomasa, diferenciándose únicamente en el grado de polimerización. Kilser y Broido

(1965), propusieron una secuencia de reacciones para la celulosa: primeramente deshidratación entre los 200 y 280 °C, por un proceso endotérmico, lo que llamaron “dehidrocelulosa”, superior a los 280 °C, la reacción de despolimerización compite con la celulosa residual dando lugar a un producto alquitranado. Otros trabajos han demostrado que el levoglucosano (1,6-anhidro- β -D-glucopiranos) es un intermediario esencial en este paso, y finalmente la descomposición de la “dehidrocelulosa” para producir gases y residuo carbonoso. Sobre esta base muchos fueron los trabajos publicados y mecanismos propuestos para la descomposición térmica de esta macromolécula (Rutkowski, 2011).

La pirólisis de las ligninas, componente térmico más estable, da lugar a compuestos aromáticos y mayor rendimiento en carbón que la celulosa. La diversidad de los productos obtenidos refleja la complejidad de las moléculas de ligninas. En la pirólisis de las ligninas se producen reacciones de despolimerización, deshidratación y descarbonilación, pérdida de sustituyentes alifáticos, desmetoxilación, reordenamiento de radicales libres y resto de craqueo (Demirbaş, 1998). Por su parte Klein y Virk (1983), han estudiado la pirólisis del fenetil-feniléter en el intervalo de 300-500 °C como modelo de los enlaces β -éter que predominan en la estructura de las ligninas. Concluyen que las rupturas primarias se producen por un mecanismo concertado y los productos intermedios sufren descomposiciones secundarias para dar lugar a moléculas más ligeras del tipo metano, agua, entre otras. Dada la composición química de las ligninas, no tiene lugar la formación de levoglucosano y la fracción de alquitranes es de constitución eminentemente fenólica (fenoles, cresoles, guayacoles y catecoles) (Rodríguez *et al.*, 1989).

Las reacciones de descomposición térmica juegan un papel crucial en los procesos de transformación de la biomasa. El análisis termogravimétrico (TGA) es un método de alta precisión para el estudio de la pirólisis en condiciones bien definidas en el régimen cinético y ha sido ampliamente utilizado para caracterizar los residuos forestales proporcionando información sobre los procesos parciales y la cinética de la reacción (Damartzis *et al.*, 2011).

Son varios los estudios de modelación y determinación de los parámetros cinéticos para diversos materiales lignocelulósicos publicados en la última década. Generalmente basados en un mecanismo cinético de tres reacciones paralelas independientes, asociado a los tres principales pseudo-componentes (hemicelulosas, celulosa y ligninas (Di Blasi, 2008; Orfão *et al.*, 1999; Gronli *et al.*, 2002; Mahanta, 2009). La inclusión de varias velocidades de calentamiento en el análisis cinético de la devolatilización de la biomasa es importante tanto desde el punto de vista teórico como práctico. La evaluación de múltiples curvas es propuesta por Caballero y Conesa (2005) para evitar el efecto de compensación de los parámetros.

1. 3 MATERIALES Y MÉTODOS

1.3.1 Selección de la muestra

Según lo establecido en la norma estándar T-57- cm-85 (TAPPI, 1998) para la selección de la muestra, se tomaron veinte árboles de *A. mangium* en una parcela de 500 m², de ocho años de edad, en una plantación de la localidad “La Ceniza” perteneciente a la Empresa Forestal Integral, Pinar del Río. Para ello se tuvo en cuenta características morfológicas semejantes en cuanto a altura del fuste, diámetro a 1,30 m, evitando deformaciones o inclinación del fuste.

1.3.2 Preparación de la muestra de madera para el análisis composicional

La preparación de la muestra se realizó conforme a la norma internacional ASTM (E1757 – 01, 2007), mediante la cual se obtuvieron partículas de aserrín de tamaño 0,4 - 0,6 mm.

1.3.3 Procedimiento para el análisis elemental e inmediato del aserrín de *A. mangium*.

Los procedimientos para análisis elemental e inmediato se realizaron de acuerdo a las normas ASTM (American Society for Testing and Materials).

Contenido de humedad

La humedad fue determinada por estabilización de la pérdida de masa de la muestra, al ser calentada bajo condiciones controladas de temperatura según la norma ASTM (E871 – 82, 2006).

Contenido de cenizas

El contenido de cenizas se determinó a partir de la norma ASTM (D1102–84, 2007), expresada como el porcentaje de residuo después de la oxidación de 580 a 600 °C.

Materia volátil

La determinación se realizó de acuerdo a la norma ASTM (E872–82, 2006), a partir del contenido de compuestos gaseosos liberados en la muestras bajo condiciones específicas, excluyendo el vapor de humedad.

Carbono fijo

El valor porcentual de carbono fijo fue calculado por la sustracción a 100 de la suma del contenido de humedad, cenizas y materia volátil, según norma ASTM (E872–82, 2006).

Carbono, hidrógeno, nitrógeno y oxígeno

El contenido de carbono e hidrógeno se determinó mediante los procedimientos descritos en la norma ASTM (E-777, 2006). El nitrógeno mediante la norma ASTM (E-778, 2006) y el oxígeno fue calculado por la sustracción a 100 de la suma del porcentaje de carbono, hidrógeno y nitrógeno.

1.3.4 Determinación de la composición química del aserrín de *A. mangium*

La determinación de la composición química del aserrín se realizó de acuerdo a lo descrito por las normas TAPPI. Estas determinaciones fueron realizadas en la Universidad Estatal de Visoça, Brasil.

Polisacáridos

El contenido de celulosa se determinó a partir del método Kürshener y Höffer (Browning, 1967) y las hemicelulosas conforme a las normas T 203 om-93, (TAPPI, 1993 y T 222 om-84, (TAPPI, 1984) con material libre de extraíbles.

Ligninas

El contenido de ligninas fue determinado según lo descrito en la norma T 222 om-98 (TAPPI, 1998) a partir del material libre de extraíbles.

Extraíbles

El material libre de extraíbles se obtuvo de acuerdo a la norma T 204 cm-97, (TAPPI, 1997), para lo cual se empleó una mezcla de etanol-tolueno 1:2, seguido de etanol y finalmente agua caliente.

1.3.5 Identificación de grupos funcionales del aserrín de *A. mangium*

Los grupos funcionales fueron identificados mediante espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier, para ello fue necesario preparar una muestra de aserrín-bromuro de potasio (pastillas de bromuro de potasio), usando espectrómetro de infrarrojo (Nicolet 8700) con un detector DTGS en intervalo de 4 000-800 cm⁻¹.

1.3.6 Determinación de parámetros termogravimétricos

El registro termogravimétrico se llevó a cabo en termobalanza (TGA-TA Instruments 2050), a varias velocidades de calentamiento 5, 10 y 10 °C min⁻¹ bajo flujo de argón de 100 mL min⁻¹, desde temperatura ambiente hasta alrededor de los 800 °C.

1.3.7 Determinación de parámetros cinéticos

Los parámetros cinéticos del proceso de descomposición de la biomasa fueron determinados a partir del modelo simplificado de reacciones paralelas independientes.

Se asumió el siguiente esquema para la descomposición de la biomasa:



Donde F_i representa las diferentes fracciones o pseudo-componentes del material sólido, V_i son los gases y volátiles condensables liberados en las reacciones correspondientes ($i=1$ a 3) y S_i es el carbón formado de la descomposición de cada F_i ($i = 1$ a 3).

Considerando una descomposición de orden n , la ecuación cinética para la pirólisis puede ser expresada:

$$-\frac{dw_{s_i}}{dt} = k_i w_{s_i}^{n_i} \quad (2)$$

ó

$$\frac{dV_i}{dt} = k_i (V_{i\infty} - V_i)^{n_i} \quad (3)$$

Para la constante cinética se aplicó la ecuación de Arrhenius:

$$K_i = K_{io} \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right) \quad i=1,2,3 \quad (4)$$

Se sustituyó la ecuación 4 en 2 y se expresó en función de la temperatura:

$$\frac{dw_i}{dT} = -\frac{K_{io}}{\beta} \exp^{-\frac{E_i}{RT}} w_i^{n_i} \quad (5)$$

Integrando,

$$f(W, T) = W_i(T_o + \Delta T) = W_i(T_o) - \Delta T \frac{K_{io}}{\beta} \exp^{-\frac{E_i}{RT}} w_i^{n_i} \quad (6)$$

El modelo cinético fue aplicado y se ajustaron simultáneamente los datos a las tres velocidades de calentamiento en condiciones dinámicas para disminuir la compensación en la estimación de los parámetros cinéticos. Se utilizó la función Solver de Excel para minimizar las diferencia entre las curvas experimentales y calculadas. La función objetivo a minimizar expresada como:

$$O.F = \sum_j \sum_i \left[\frac{\left(\left(\frac{dw}{dt} \right)_{\text{exp}} - \left(\frac{dw}{dt} \right)_{\text{cal}} \right)}{\max \left(\frac{dw}{dx} \right)_{j \text{ exp}}} \right]^2 \quad (7)$$

Donde 'i' representa los datos experimentales en el tiempo 't' a la velocidad de calentamiento 'j', los valores de $\left(\frac{dw}{dt}\right)_{\text{exp}}$ y $\left(\frac{dw}{dt}\right)_{\text{cal}}$ son las derivadas respecto a la pérdida de masa experimental y calculada, respectivamente. El denominador en la ecuación 7 representa el máximo valor experimental de cada velocidad de calentamiento que es considerada para minimizar las diferencias en el proceso de estimación (Jauhiainen *et al.*, 2004; Moltó *et al.*, 2009).

La desviación entre la curva experimental y la calculada fue definido en correspondencia a valores de estudios anteriores (Meszaros *et al.*, 2004; Branca *et al.*, 2005; Abreu *et al.*, 2012) como:

$$fit(\%) = \frac{\sqrt{S/N}}{\max\left(\frac{dw}{dt_j}\right)_{\text{exp}}} * 100 \quad (8)$$

$$S = \sum_{j=1,N} \left[\left(\frac{dw}{dt_j}\right)_{\text{exp}} - \left(\frac{dw}{dt_j}\right)_{\text{cal}} \right]^2 \quad (9)$$

N: es el número de puntos experimentales o mediciones.

1.3.8 Diseño de experimento

Se diseñó un experimento factorial 2^n donde $n=2$, para analizar la influencia de las variables temperatura final del proceso y velocidad de calentamiento en los rendimientos de biocarbón. La temperatura mínima de trabajo fue 270 °C y la máxima 500 °C, realizando cinco réplicas en el punto central (385 °C). La información se procesó mediante el software Desing Expert ver.7.

1.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1.4.1 Análisis elemental e inmediato del aserrín *A. mangium*

Los valores obtenidos del análisis elemental para la especie en estudio (Tabla 1) son similares a los reportados para *Dichrostachys cinerea*, *Leucaena leucocephala* y *Lysiloma latisiliquum*, con valores de compuestos volátiles de 81,3 %; 79,9 % y 77,80 % respectivamente (Suárez *et al.*, 2000), así como similares valores de carbono fijo y porcentaje de cenizas, sin embargo los contenidos de materia volátil en la especie fueron similares a los informados por Suarez *et al.*, (2000) que refiere que la biomasa lignocelulósica presenta contenidos de materia volátil elevados.

Tabla 1. Análisis elemental e inmediato del aserrín de *A. mangium*

Análisis elemental		Análisis inmediato	
	Masa (%)		Masa (%)
Carbono	45,45 ± 0,24	Humedad	3,78 ± 0,16
Hidrógeno	6,30 ± 0,08	Cenizas	0,97 ± 0,05
Nitrógeno	0,23 ± 0,01	Volátiles	82,43 ± 0,38
Oxígeno	48,26 ± 0,34	Carbono fijo	12,82 ± 0,40

1.4.2 Composición química del aserrín de *A. mangium*

En la Tabla 2 se presentan los resultados de la composición química del aserrín de *A. mangium*. Con relación al contenido de polisacáridos, la celulosa (glucanos) ocupó el mayor porcentaje, seguido por los xilanos y en menor proporción los arabinanos. Valores similares han sido informados por otros autores en especies latifoliadas, Carballo *et al.*, (2004 a,b) en *Corymbia citriodora*, Orea *et al.*, (2004 a,b) en *Eucalyptus saligna* Smith y *Eucalyptus pellita* F. Muell, y Leal *et al.*, (2011) en *Eucalyptus grandis*

Hill ex Maiden. Por su parte, el contenido de ligninas se encontró dentro de los intervalos reportados por estos autores para madera de latifolias.

Tabla 2. Composición química del aserrín de *A. mangium*

Tipo de compuesto		Contenido
Polisacáridos (%)	Glucanos	44,05 ± 0,3
	Xilanos	14,05 ± 0,07
	Galactanos	0,55 ± 0,07
	Mananos	1,30 ± 0,14
	Arabinanos	0,25 ± 0,07
Ligninas (%)	Insoluble	28,25 ± 0,21
	Soluble	1,45 ± 0,07
	Total	29,70± 0,14
Compuestos extraíbles (%) =[(etanol : tolueno 1:2), (etanol) y (agua caliente)]		4,45 ± 0,07

1.4.3 Grupos funcionales del aserrín identificados por espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier

En la Figura 4 se muestra el espectro infrarrojo con transformada de Fourier para la identificación de los grupos funcionales. Se pueden observar las señales características de los grupos presentes, una banda intensa centrada alrededor de los 3 400 cm⁻¹ correspondiente a grupos hidroxilos (O-H), una banda de absorción sobre los 2 920 cm⁻¹ correspondiente a las vibraciones de enlaces simples carbono-hidrógeno (C-H). En la región 1 800-800 cm⁻¹, correspondiente a la región de huella de la molécula, los picos son asignados (Harrington *et al.*, 1964; Hergert,1971; Schultz y Glasser, 1986; Faix *et al.*, 1992; Collier *et al.*,1992; Pandey y Theagarajan, 1997; Bilba y Ouensanga,1996; Pandey y Pitman, 2003): 1 738 cm⁻¹ grupos carbonilos (C=O) no conjugados en xilanos (hemicelulosas), entre 1 450-1600 cm⁻¹ se presentan las bandas de absorción correspondiente al esqueleto aromático (C=C) en ligninas, sobre los 1 470–1430

cm^{-1} grupos metoxilos ($\text{O}-\text{CH}_3$), las bandas en $1\,170\text{ cm}^{-1}$ y $1\,080\text{ cm}^{-1}$ ($\text{C}-\text{O}-\text{C}$) correspondientes a esqueletos piranósicos de celulosa y hemicelulosas, en $1\,237\text{ cm}^{-1}$ enlaces alquil-aril en ligninas y $1\,048\text{ cm}^{-1}$ ($\text{C}-\text{O}$) vibraciones correspondientes al esqueleto aromático en ligninas.

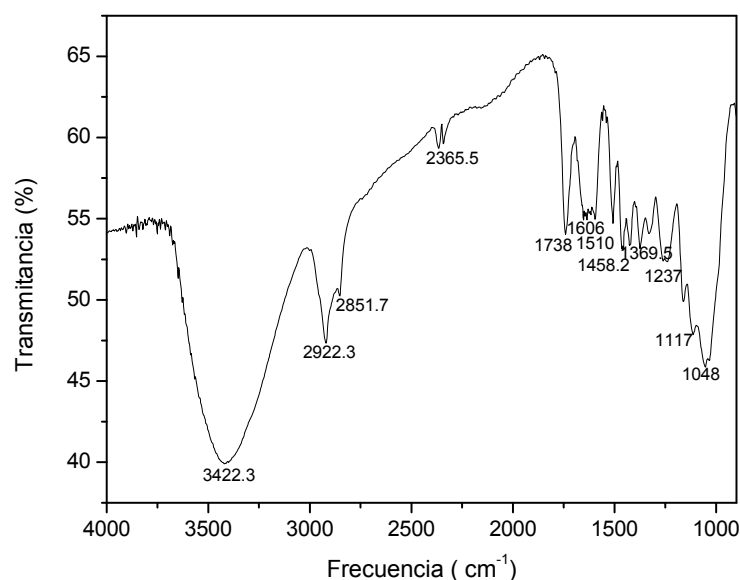


Figura 4. Espectro infrarrojo con transformada de Fourier del aserrín de *A. mangium*

1.4.4 Análisis termogravimétrico del aserrín de *A. mangium*

En la Figura 5 se muestran las curvas de pérdida de masa y su derivada, obtenidas durante la pirólisis de aserrín de *A. mangium* bajo atmósfera inerte de argón con velocidades de calentamiento de 5, 10 y 15 $^{\circ}\text{C min}^{-1}$, las cuales siguen la forma característica de la descomposición de materiales lignocelulósicos (Meszaros *et al.*, 2004).

La curva de descomposición de biomasa lignocelulósica se puede dividir en tres etapas que se corresponden a eventos sucesivos: a) pérdida de humedad, b) volatilización de compuestos de baja masa molecular y c) descomposición de los macrocomponentes

como hemicelulosas, celulosa y ligninas (Orfão *et al.*, 1999, Meszaros *et al.*, 2004; Jeguirim y Trouvé 2009). Conforme a esto, el evento de la pérdida de humedad se inició cerca de los 30 °C y continuó hasta aproximadamente los 130 °C, seguido de la descomposición de los compuestos volátiles. A partir de los 260 °C comienza la descomposición de las hemicelulosas (ver curva de pérdida de masa Figura 5).

La mayor descomposición ocurrió en el intervalo de 300 °C a 400 °C (60 % aproximadamente de la masa), representado por un rápido descenso de masa atribuido fundamentalmente a la descomposición de la celulosa. En el caso de las ligninas dada a la mayor complejidad estructural que imponen sus unidades, hace que se descompongan durante todo el proceso (Jeguirim y Trouvé, 2009). De forma general, los resultados son similares con relación al comportamiento en la curva para todas las latifolias (Kyun *et al.*, 2010) y las diferencias residen en desplazamientos de las temperaturas de descomposición para las hemicelulosas y celulosa.

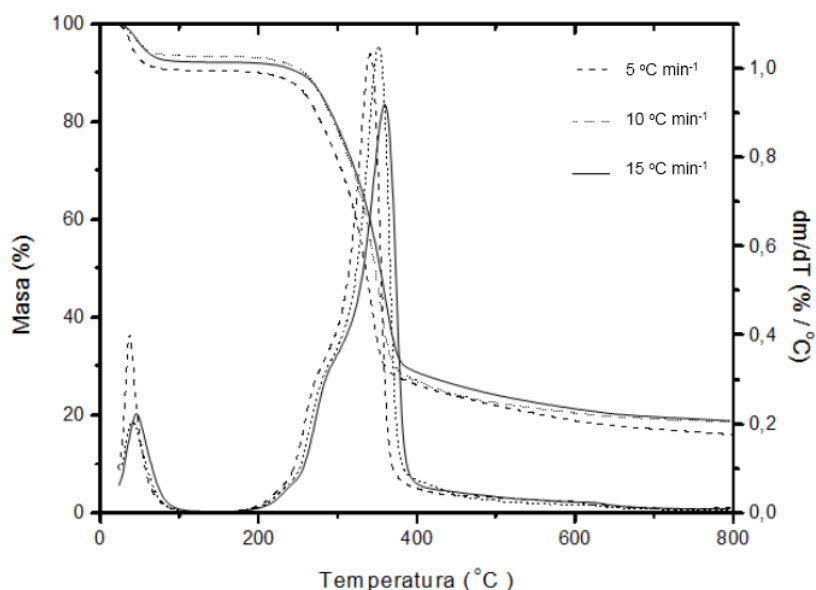


Figura 5. Termodescomposición del aserrín de *A. mangium* para velocidades de calentamiento 5, 10 y 15 °C min⁻¹

1.4.5 Parámetros cinéticos

En la Figura 6 se observa la curva calculada determinada por el modelo y la real (datos experimentales) de la descomposición de la biomasa a $10\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$ para cada una de los componentes y los parámetros cinéticos estimados en el estudio (Tabla 3). El ajuste entre ambas curvas fue bueno ya que solo se diferencian en menos de un 3 % (Tabla 4). El comportamiento de las curvas de cada componente es similar a lo informado para *Dichrostachys cinera* (Abreu *et al.*, 2013) y análoga a las curvas informadas para dichos pseudo-componentes individuales (Antal y Varhegyi, 1995).

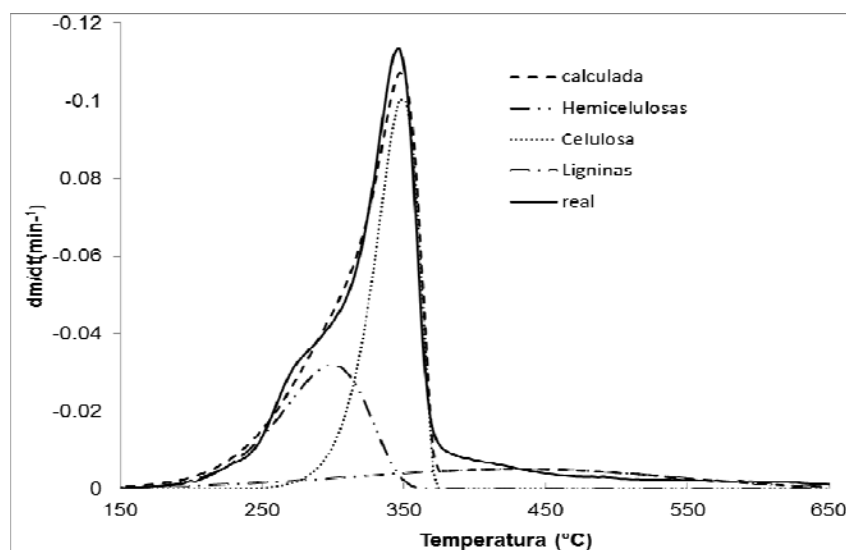


Figura 6. Curva termogravimétrica de la pirólisis del aserrín de *A. mangium* a $10\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$

Los valores de energía de activación para las tres fracciones correspondientes a los componentes se encuentran dentro los intervalos reportados entre $80\text{--}116\text{ kJ mol}^{-1}$ para hemicelulosas, $180\text{--}286\text{ kJ mol}^{-1}$ para la celulosa, y $18\text{--}65\text{ kJ mol}^{-1}$ para las ligninas (Gronli *et al.*, 2002, Meszaros *et al.*, 2004, Mahanta, 2009).

Tabla 3. Parámetros cinéticos de la pirólisis del aserrín de *A. mangium*.

Fracción	Factor pre-exponencial (min ⁻¹)	Energía de activación (kJ mol ⁻¹)
Lignina	14,55	30,80
Celulosa	1,02 x 10 ¹⁵	181,59
Hemicelulosas	4,70 x 10 ⁵	79,04

En la Tabla 4 se muestra el factor de contribución de cada componente (expresado en porciento) y el porcentaje de ajuste entre las curvas experimental y calculada para cada velocidad de calentamiento, expresada como porcentaje de la fracción de masa total, se ajusta de manera aceptable en los intervalos de valores definidos para hemicelulosas de 20-30 %, celulosa de 28-38 %y 10-15 % para ligninas (Di Blasi, 2008).

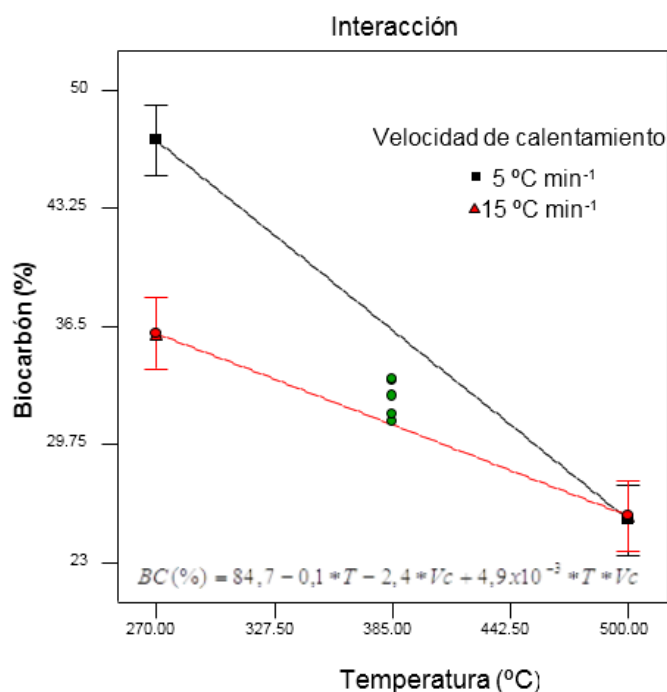
Tabla 4. Factor de contribución en porcentaje de cada componente y el porcentaje de ajuste entre las curvas experimental y calculada para cada velocidad de calentamiento

Fracción	Velocidad de calentamiento (°C min ⁻¹)		
	5	10	15
	Factor de contribución (%)		
Lignina	23	14	17
Celulosa	42	41	36
Hemicelulosas	18	25	27
Ajuste (%)	2,31	2,30	31

1.4.6 Análisis de la influencia de la temperatura y velocidad de calentamiento en los rendimientos de biocarbón

En la Figura 7 se representa la influencia de la temperatura y la velocidad de calentamiento, así como la interacción entre ambas variables en el intervalo de máxima descomposición de la biomasa de *A. mangium* durante el proceso de transformación a

biocarbón. Además se presenta la ecuación para la variable respuesta (porcentaje de biocarbón), con la dependencia de la temperatura y la velocidad de calentamiento.



Donde:

BC: rendimiento de biocarbón

T: temperatura

Vc: velocidad de calentamiento

Figura 7. Influencia de la temperatura y la velocidad de calentamiento en los rendimientos de biocarbón.

Se encontró que los mayores porcentajes de biocarbón se obtuvieron para temperaturas de 270 °C y velocidad de calentamiento de 5 °C min⁻¹, mientras que para esta misma temperatura y una velocidad de calentamiento de 15 °C min⁻¹ disminuyeron los rendimientos. Para temperaturas superiores (500 °C), los rendimientos son los mismos para ambas velocidades de calentamiento, lo que demuestra que la velocidad de calentamiento puede ser considerable solo para temperaturas menores. También se encontró interacción entre la temperatura y la velocidad de calentamiento en la variable respuesta.

CONCLUSIONES PARCIALES

- El aserrín de *A. mangium* es un material lignocelulósico conveniente para la obtención de biocarbón.
- El modelo cinético de tres reacciones paralelas independientes predice las curvas de descomposición de la biomasa de *A. mangium* con una desviación menor de 3 % entre la calculada y experimental.
- Los mayores rendimientos de biocarbón se obtuvieron a temperatura de 270 °C y velocidad de calentamiento de 5 °C min⁻¹.

CAPÍTULO II

CAPÍTULO II

PROPIEDADES QUÍMICAS Y FÍSICAS DEL BIOCARBÓN Y DE LOS SUSTRATOS EN MEZCLAS CON BIOCARBÓN

2.1 INTRODUCCIÓN

La importancia del conocimiento de las propiedades de los materiales usados para producir plantas forestales resulta necesario dado los requerimientos de estas para su desarrollo, de ahí que para el logro de un sustrato con características adecuadas, generalmente, se requiere de la combinación de dos o más componentes. En la actualidad se continúa la búsqueda de nuevas combinaciones de materiales que garanticen las propiedades deseadas y minimizar las actividades de preparación del sustrato.

El biocarbón ha sido ampliamente empleado en suelos agrícolas, atribuyéndosele propiedades que contribuyen al mejoramiento de su fertilidad y sustentabilidad, a la vez que mejora sus propiedades químicas, físicas y biológicas; proporciona retención de nutrientes y mejora la capacidad de intercambio catiónico (CIC), y participa en los procesos biogeoquímicos del suelo, así como en reacciones de absorción de nutrientes (Glaser *et al.*, 2002; Smith *et al.*, 2010; Durenkamp *et al.*, 2010; Graber *et al.*, 2010).

El tipo de superficie encontrada en el biocarbón con gran cantidad de grupos aromáticos, se informa que pudiera ser responsable de los aumentos de la CIC (Schmidt *et al.*, 1999). Dicha propiedad lo hace un material bueno para la retención y disponibilidad de nutrientes en el suelo, reciclaje de nutrientes lo cual mejora el crecimiento y aumento en la productividad de los cultivos (Steiner *et al.*, 2007, Madari, 2009; Novak *et al.*, 2010). La aplicación de biocarbón en suelos ejerce también una

influencia en el propio suelo mejorando la calidad de los mismos al disminuir las pérdidas de nutrientes por lixiviación (Laird *et al.*, 2010).

Sin embargo, el efecto de las aplicaciones de biocarbón en el sector forestal ha estado poco documentado y su potencial uso en la producción de plantas en viveros forestales con tecnología de tubetes representa una oportunidad escasamente estudiada, por lo que el objetivo del presente capítulo consistió en **determinar las propiedades químicas y físicas del biocarbón y de los sustratos en mezclas con biocarbón.**

2.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.2.1 Biocarbón y sus propiedades

El biocarbón es el producto resultante del proceso de combustión incompleta de un material lignocelulósico como la madera. Este posee un alto contenido de carbono con gran área superficial y porosidad como consecuencia del proceso de termoconversión. Sus características químicas, físicas y químico-físicas, varían en consecuencia con el proceso de pirólisis, tipo de biomasa y la granulometría (Laird *et al.*, 2010).

Este material puede ser considerado estable, aunque sufre biodegradación y transformación comparado con otras formas de materia orgánica, dentro de una escala de tiempo de décadas o siglos en suelos. Se estima que la vida media de las partículas carbonizadas con tamaño menor de 2 mm es de alrededor de 50 años y aquellas mayores en 100 años (Bird, 1999).

El biocarbón se describe como un material capaz de retener fuertemente fosfato en forma aniónica (Lehmann, 2007; Falcão *et al.*, 2003). La oxidación que sufre el material lignocelulósico y la consecuente formación de grupos carboxílicos u otros grupos funcionales con cargas negativas pueden ser la principal razón para la alta CIC observada (Glaser *et al.*, 2001, Lehmann, 2005). Además, el biocarbón disminuye la concentración de cadmio, arsénico y cinc soluble en suelos contaminados (Beesley y Marmiroli, 2011).

Entre los efectos de su aplicación al suelo se encuentra el aumento del pH de este, disminuyendo la saturación de aluminio en los suelos ácidos, mejorando la productividad (Mark, 2009; Laird *et al.*, 2010). Además, Chidumayo (1994) encontró mejora de un 30 % en la germinación, un 24 % en el crecimiento y 13 % en producción

de biomasa, en siete tipos de plantas leñosas, que se desarrollaban en suelos alfisoles y ultisoles.

2.2.2 Los sustratos en la producción de plántulas forestales en tubetes

El sustrato es el medio en que las raíces se desarrollan para formar el soporte estructural de la parte aérea de las plántulas y que suministra las cantidades necesarias de agua, dioxígeno y nutrientes (Carneiro, 1995). Guerrini y Trigueiro (2004), argumentan que los sustratos para la producción de plántulas son definidos como el medio adecuado para el sustento de plantas y deben presentar propiedades que permitan la retención de cantidades suficientes de agua, dioxígeno y nutrientes, además de ofrecer pH compatible con la especie vegetal, ausencia de elementos químicos en niveles tóxicos y conductividad eléctrica adecuada.

El sustrato como medio físico se compone de tres fases: líquida, sólida (mezcla de partículas minerales y orgánicas) y gas. El estudio de la distribución porcentual de estos componentes es crucial para la comprensión de los procesos de disponibilidad de nutrientes que actuarán directamente sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas. La calidad del sustrato en los viveros forestales como medio de crecimiento, es una de las claves del éxito de la producción de plantas. Un buen sustrato puede resultar de manera muy deficiente, lo que obliga que se deba conocer minuciosamente las características de los sustratos si se quiere optimizar su utilización (Ansorena, 1994).

Otros aspectos importantes están relacionados con la operacionalidad en el vivero. El llenado debe realizarse buscando propiedades tales como: baja densidad para facilitar el manejo y transporte, la permeabilidad que permita el desarrollo de las raíces en todo su volumen; buena sanidad y fertilidad adecuada para la producción de plantas con

buen estado fisiológico (Serrada, 1995), aunque la selección de los componentes del sustrato dependerá de su disponibilidad y costo.

2.2.3 Características físicas y químicas de los sustratos

El estudio de las propiedades físicas de los sustratos, especialmente las relacionadas con la disponibilidad de agua-aire, comenzó desde las ciencias del suelo con técnicas simples y las cuales fueron refinándose y adaptándose a las características propias de los nuevos materiales, surgiendo así variables y métodos de medida específicos para la caracterización física de los sustratos (Vence, 2008).

Para la evaluación de un sustrato es imprescindible la valoración de sus propiedades físicas tales como granulometría, retención de agua y aireación. Generalmente suele darse más importancia a las propiedades físicas de los sustratos, ya que una vez seleccionada una mezcla como medio de cultivo, apenas puede modificarse su estructura física, a diferencia de su composición química, que puede ser alterada durante el desarrollo de la planta mediante el riego y el abonado. Para cumplir correctamente sus funciones, regulación del suministro de agua y aire, los sustratos deben poseer una elevada porosidad y capacidad de retención de agua, unidos a un drenaje rápido y una buena aireación, de ahí la importancia de la granulometría en las propiedades físicas de los sustratos (Alarcón, 2004).

Otra propiedad importante es la densidad de un sustrato, que se puede referir bien a la del material sólido que lo compone y entonces se habla de densidad real, o bien a la densidad calculada considerando el espacio total por los componentes sólidos más el espacio poroso, y se denomina densidad aparente. El valor de la densidad real varía según la materia de que se trate. A diferencia de la densidad aparente, esta indica indirectamente la porosidad del sustrato, su facilidad de transporte y manejo y no

depende del grado de compactación ni del tamaño de las partículas. Los valores de densidad aparente se prefieren bajos y que garanticen consistencia de la estructura (Ansorena, 1994).

El tipo y tamaño de los tubetes a utilizar requiere que se seleccione un sustrato con determinadas características físicas que faciliten el desarrollo de las plántulas y el programa de riego del cultivo (Prasad y Ni Chualáin, 2004; Raviv *et al.*, 2004). La granulometría del sustrato determina el tamaño, distribución de los poros, la proporción agua-aire y en consecuencia el régimen de riego y el desarrollo de las plantas (Handreck, 1983; Burés *et al.*, 1997; Carmona *et al.*, 2003; Noguera *et al.*, 2003; Prasad y Ni Chualáin, 2004). Es por ello, que el análisis granulométrico se ha considerado como una práctica importante en la caracterización de sustratos (Burés *et al.*, 1997; Carmona *et al.*, 2003). Varios materiales son utilizados para preparar un sustrato pero las características resultantes de las mezclas no siempre son la suma de las características de sus componentes, sino sus propiedades como un todo.

Se recomienda que el sustrato sea lo más estable posible donde la descomposición de la materia orgánica en los tubetes sea mínima, pues esta conlleva a cambios a una textura mucho más fina con aireación pobre (Burés, 2002). Cualquier cambio en la estructura del sustrato en pequeños volúmenes tiene un efecto negativo para el crecimiento de las raíces y por tanto durante el desarrollo de las plantas.

Las propiedades químicas de un sustrato dependerán en gran parte de la disposición de grupos funcionales y disponibilidad de nutrientes. El sustrato ideal debe tener nutrientes en forma asimilable para la planta. El análisis de las propiedades químicas de un medio es importante debido a su interacción con los fertilizantes y su efecto en el desarrollo de las plantas, siendo el pH y la conductividad eléctrica determinantes en la

selección de los sustratos. El pH de la disolución del sustrato es importantes pues influye en la especie a cultivar, de su formulación y ajuste al valor adecuado, por lo que se hace necesario determinar la disponibilidad potencial de nutrientes para la planta antes de la siembra (Landis *et al.*, 2000).

2.3 MATERIALES Y MÉTODOS

2.3.1 Caracterización del biocarbón

Debido a que el biocarbón de *A. mangium* es uno de los materiales utilizados en las formulaciones de sustratos fue necesario su caracterización, lo cual fue realizada en los laboratorios de Ciencias del Suelo y Caracterización de Sólidos de la Universidad Estatal de Campinas (UNICAMP), Brasil.

Porosidad y área superficial específica

La porosidad y el área superficial específica se determinaron a través del analizador Micromeritics ASAP 2021 sorptometer (Norcross, GA). Para ello, se pasó un gas, CO₂, en condiciones isotérmicas, presión y vapor de equilibrio, en la superficie del sólido. Una vez adquirida la isoterma, se evaluó la cantidad de gas condensada en la superficie del sólido. Se calculó el área superficial y las características de los poros a través de la teoría desarrollada para el tratamiento de los datos absorción/desorción por el método Dubinin-Radushkevitch, descrito por Pennell (2002). El tamaño de los poros fue clasificado de acuerdo a la clasificación adoptada por la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC) (Lin y Teng, 2002).

Microscopía electrónica de barrido

Se realizó el análisis de la microestructura y la topografía de la superficie del biocarbón mediante el empleo del SEM 515-Philips, con aumento de 42 a 2 000 veces y resolución en el orden de 3 a 100 nm, para lo cual se recubrió la muestra con una fina capa de oro, material conductor, que permitió la generación de las imágenes (Verhoeven, 1984).

Identificación y cuantificación de grupos funcionales ácidos

Los grupos funcionales fueron identificados mediante espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier, para ello fue necesario preparar una muestra de biocarbón-bromuro de potasio (pastillas de bromuro de potasio), usando espectrómetro de infrarrojo (Nicolet 8700) con un detector DTGS en intervalo de 4 000-800 cm^{-1} .

Se determinaron las concentraciones relativas de los diferentes grupos funcionales en el biocarbón, basado en las diferencias de la constante de disociación (pK) de los grupos funcionales, para lo cual se utilizó 0,5 g de biocarbón y se adicionaron 20 ml de las disoluciones: 0,1 M de bicarbonato de sodio (NaHCO_3), 0,1 M de hidróxido de sodio (NaOH) y 0,2 M de carbonato de sodio (Na_2CO_3), en cada uno de los tubos, separadamente. Se agitó por 72 horas a temperatura ambiente. Se centrifugó por 20 minutos y se filtró. Se valoraron alícuotas de 5 ml de cada una de las disoluciones con 0,1 M de HCl estandarizado. Se utilizó como indicadores, anaranjado de metilo para las disoluciones que contenían Na_2CO_3 y NaHCO_3 y fenolftaleína para NaOH (Boehm, 1994).

2.3.2 Sustratos empleados y tipo de envase

Se utilizaron diferentes sustratos: cachaza, turba y biocarbón, además se emplearon mezclas volumétricas de cachaza-biocarbón y turba-biocarbón (4:1; 1:1; 1:4). El envase empleado fue el tubete plástico de color negro de 90 cm^3 de capacidad. La composición de los sustratos se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Composición de los sustratos empleados en el experimento

Sustrato	Variante	Abreviatura	Composición (v/v)
Biocarbón	BC	BC	100
Turba	T	T	100
Cachaza	C	C	100
Turba + biocarbón	T + BC	T20	20 + 80
Turba + biocarbón	T + BC	T50	50 + 50
Turba + biocarbón	T + BC	T80	80 + 20
Cachaza + biocarbón	C + BC	C20	20 + 80
Cachaza + biocarbón	C + BC	C50	50 + 50
Cachaza + biocarbón	C + BC	C80	80 + 20

2.3.3 Determinación de las propiedades de los sustratos

Propiedades químicas

Los análisis químicos de los sustratos se realizaron en el laboratorio provincial de suelos del Ministerio de la Agricultura en Pinar del Río, a partir de las normas cubanas para este tipo de análisis (NC-XX 2009), donde se determinó el porcentaje de materia orgánica, contenido de potasio, calcio, sodio, nitrógeno total, pH y conductividad eléctrica.

Propiedades físicas

Se determinaron propiedades físicas a partir de las metodologías descritas por Ansorena (1994) (densidad aparente y retención de humedad) y el diámetro medio de las partículas (D_{mp}) (Anexo 1) con la consiguiente distribución granulométrica, por el método de tamizado para la serie de tamices ASTM $\sqrt{2}$ (ASTM E-29, 1972).

La densidad aparente se determinó por el método del cilindro, calculándose mediante la expresión:

$$da = \frac{M}{V} \quad (10)$$

Donde: M representa la masa del sustrato (g); V el volumen del cilindro (cm³)

2.3.4 Destubetado, estabilidad del cepellón y arquitectura radical

Para las variables destubetado, estabilidad del cepellón y arquitectura radical se analizaron niveles del grado de complejidad como se indica en la Tabla 6.

Tabla 6. Niveles establecidos para las variables destubetado, estabilidad del cepellón y arquitectura radical

Variable	Nivel		
	1	2	3
Destubetado	Fácil	Medio	Difícil
Estabilidad del cepellón	Alta	Intermedia	Baja
Arquitectura radical	Buena	Aceptable	Mala

2.3.5 Procesamiento estadístico

Se realizó un análisis de varianza de clasificación simple y una prueba de comparación de medias de Duncan para un 95 % de probabilidad para la comparación de las propiedades químicas y físicas de los sustratos; mientras que para las variables nominales (destubetado, estabilidad del cepellón y arquitectura radical), se realizó un análisis de correspondencia. Para el procesamiento de los datos se utilizó el paquete estadístico SPSS ver. 15.0 para Windows.

2.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.4.1 Porosidad, área superficial específica y funcionalidades

En la Tabla 7 se muestran las propiedades físicas y funcionalidad del biocarbón, las propiedades de absorción se atribuyen a la presencia de meso y microporos lo que puede también relacionarse con la alta capacidad para retener agua. El material posee un área superficial específica grande de $19 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$. La presencia de grupos funcionales en el biocarbón muestra que es un material activo lo que revela su capacidad para intercambiar iones y sugiere su papel para disminuir las pérdidas por lixiviación.

Tabla 7. Propiedades físicas y grupos funcionales ácidos

Propiedades		Valor
Área superficial específica ($\text{m}^2 \text{ g}^{-1}$)		19,0
Tamaño medio de poros (Å)		102,14
Volumen de poros (%)	Macro poros	0,0
	Meso poros	80,7
	Micro poros	20,7
Total de poros ($\text{cm}^3 \text{ g}^{-1}$)		0,0112
Grupos funcionales (%)	Carboxílicos	13,56
	Lactonas	11,12
	Fenoles	75,32

2.4.2 Morfología del biocarbón

La Figura 8 muestra las diferencias morfológicas y texturales de las partículas en el biocarbón. De forma general la superficie de las partículas es irregular. En la Tabla 8 se aprecia que los diámetros de poros se encuentran entre 12 a 398 Å. Los mesoporos que representan el mayor porcentaje de poros se encuentran entre los 28-Ø-360 Å, mientras que los microporos varían en un intervalo de 12-Ø-25 Å, esta variación en los

diámetros, de los volúmenes y las áreas superficiales en estos meso y microporos determinan su capacidad de absorción de agua y en segundo lugar la de los nutrientes (Byrne y Nagle, 1996).

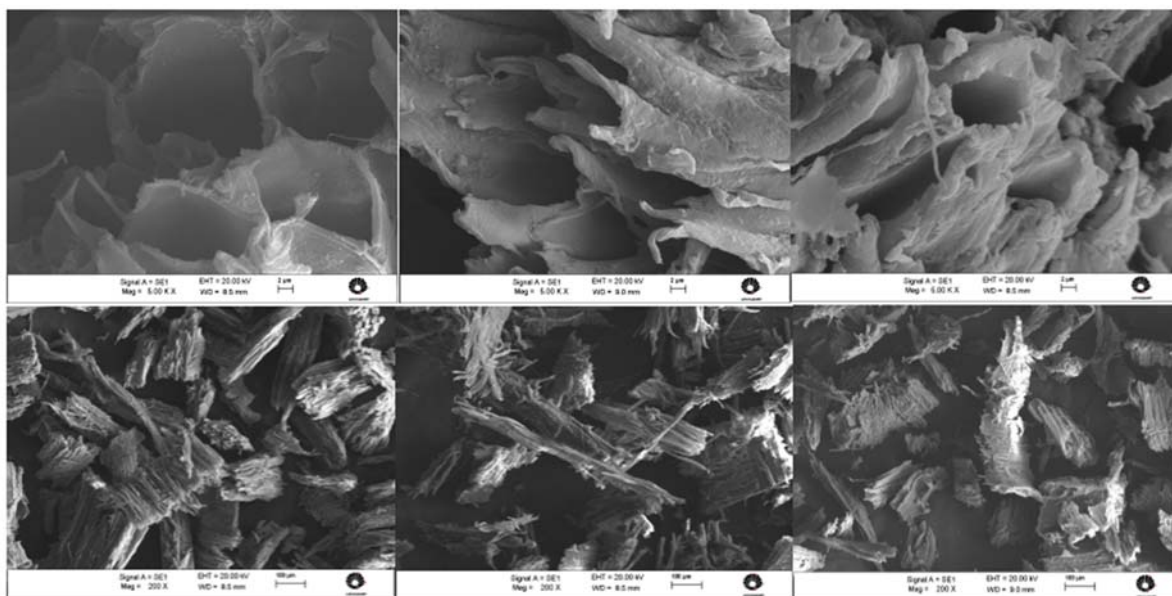


Figura 8. Micrografía electrónica de barrido del biocarbón, parte superior a 5.00 KX e inferior a 200X

Tabla 8. Distribución de los poros del biocarbón

Diámetro de los poros (Å)	Diámetro de los poros (media)	Volumen de los poros (cm ³ g ⁻¹)	Área superficial (m ² g ⁻¹)
12,59-15,85	14,22	7,13 x 10 ⁻⁰⁴	1,66 x 10 ⁺⁰⁰
15,85-19,95	17,90	5,12 x 10 ⁻⁰⁴	7,00 x 10 ⁻⁰¹
19,95-25,12	22,54	4,97 x 10 ⁻⁰⁴	6,58 x 10 ⁻⁰¹
25,12-31,62	28,37	3,77 x 10 ⁻⁰⁴	6,53 x 10 ⁻⁰¹
31,62-39,81	35,72	5,88 x 10 ⁻⁰⁴	8,13 x 10 ⁻⁰¹
39,81-50,12	44,96	1,10 x 10 ⁻⁰⁴	1,21 x 10 ⁺⁰⁰
50,12-63,10	56,61	1,31 x 10 ⁻⁰⁴	1,16 x 10 ⁺⁰⁰
63,10-79,43	71,26	8,70 x 10 ⁻⁰⁴	6,15 x 10 ⁻⁰¹
79,43-100,00	89,72	8,10 x 10 ⁻⁰⁴	4,46 x 10 ⁻⁰¹

100,00-125,89	112,95	$6,35 \times 10^{-04}$	$2,88 \times 10^{-01}$
125,89-158,49	142,19	$1,90 \times 10^{-04}$	$6,64 \times 10^{-02}$
158,49-199,53	179,01	$1,19 \times 10^{-04}$	$3,30 \times 10^{-01}$
199,53-251,19	225,36	$9,64 \times 10^{-04}$	$2,16 \times 10^{-01}$
251,19-316,23	283,71	$7,13 \times 10^{-04}$	$1,25 \times 10^{-01}$
316,23-398,11	357,17	$7,43 \times 10^{-04}$	$1,05 \times 10^{-01}$

2.4.3 Análisis por espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier

El análisis de espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier es una herramienta frecuentemente usada en investigaciones de la química de superficie de carbones, que proporciona información valiosa sobre la naturaleza química y la proporción de los grupos funcionales en la superficie (Purevsuren *et al.*, 2003). La Figura 9 muestra el espectro infrarrojo con transformada de Fourier para el aserrín y el biocarbón obtenido bajo diferentes condiciones experimentales. Se puede observar que el biocarbón presentó cambios estructurales, los cuales son fácilmente distinguidos por las intensidades de las bandas de absorción características.

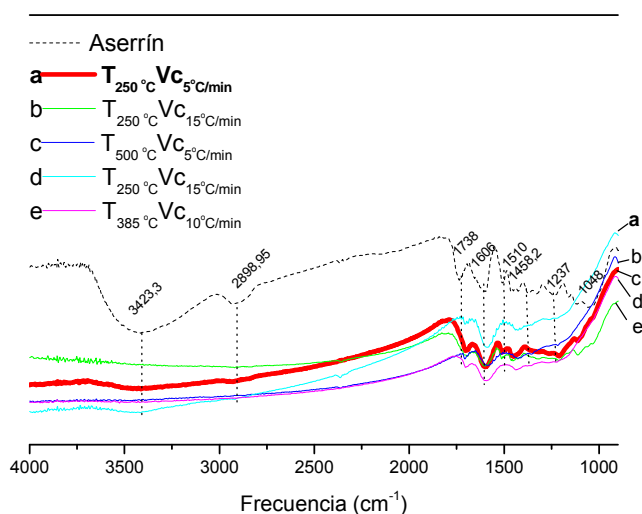


Figura 9. Espectro infrarrojo con transformada de Fourier del aserrín y del biocarbón de *A. mangium* a diferentes condiciones

Como se puede apreciar en el espectro el material carbonoso mantiene la funcionalidad pero en menor proporción que el material lignocelulósico (aserrín) lo cual confirma su habilidad para el intercambio iónico.

2.4.4 Caracterización química de los sustratos en mezclas con biocarbón

Los sustratos presentaron diferencias significativas en la mayoría de sus características químicas (Tabla 9). Las combinaciones cachaza-biocarbón y turba-biocarbón se encontraron entre los valores medios de los constituyentes individuales, lo cual está determinado por la proporción de biocarbón en las mezclas.

Las determinaciones del pH fueron similares para los componentes individuales de biocarbón y cachaza, y no así con turba que presentó pH más bajo. Para las mezclas cachaza-biocarbón el biocarbón no ejerció efecto sobre esta propiedad, sin embargo en mezcla con turba la presencia de biocarbón superior al 20 % influyó en el aumento de pH. De acuerdo a los valores de pH, los sustratos BC, C, C20, C50 y C80 son calificados como próximo a neutros mientras que T, T20, T50 y T80 son ligeramente ácidos según MINAGRI, 1984. No obstante en cualquiera de los sustratos estudiados, el pH se encuentra entre los intervalos reportados y comúnmente evaluados para la producción de plantas forestales en tubetes. Asimismo, valores de pH entre 5,5 - 6,5 incrementan la disponibilidad de elementos nutricionales (Taiz y Zeiger, 2006), sumado al hecho de que las especies forestales, aunque toleran un intervalo relativamente amplio de valores de pH, pueden ser sensibles si esta variable se encuentra fuera del intervalo 5,3 - 6,5 (Landis *et al.*, 2000, Guzmán, 2003), por lo que todas las mezclas con biocarbón resultan apropiadas para la producción de plantas.

Tabla 9. Valores medios y desviación típica de la composición química de los sustratos

S	PH	CE (S/cm)	MO (%)	K ⁺ (%)	Ca ²⁺ (%)	Na ⁺ (%)	N (%)
BC	6,81 ^a ±0,11	0,34 ^e ±0,01	95,47 ^a ±1,18	0,06 ^b ±0,00	0,64 ^f ±0,14	0,06 ^a ±0,41	1,64 ^f ±0,03
T	5,61 ^c ±0,32	2,15 ^{ab} ±0,21	40,03 ^f ±4,28	0,07 ^b ±0,02	1,81 ^{de} ±0,46	0,04 ^a ±0,01	1,99 ^d ±0,05
C	6,64 ^a ±0,17	2,75 ^a ±0,82	46,95 ^e ±1,36	0,14 ^a ±0,02	3,88 ^a ±0,31	0,04 ^a ±0,00	3,05 ^a ±0,05
T20	6,01 ^b ±0,04	0,91 ^{de} ±0,17	68,21 ^c ±4,30	0,07 ^b ±0,03	2,08 ^{cde} ±0,74	0,08 ^a ±0,02	1,84 ^e ±0,14
T50	6,01 ^b ±0,02	1,54 ^{bcd} ±0,07	57,23 ^d ±1,63	0,06 ^b ±0,01	2,72 ^{bc} ±0,39	0,07 ^a ±0,01	1,83 ^e ±0,15
T80	5,60 ^c ±0,01	1,94 ^{bc} ±0,11	49,97 ^e ±2,74	0,05 ^b ±0,01	1,68 ^e ±0,56	0,05 ^a ±0,00	1,90 ^{de} ±0,06
C20	6,83 ^a ±0,03	1,20 ^{cd} ±0,58	75,62 ^b ±3,23	0,12 ^a ±0,03	1,87 ^{de} ±0,05	0,06 ^a ±0,02	1,94 ^{de} ±0,11
C50	6,82 ^a ±0,03	1,56 ^{bcd} ±0,53	64,06 ^c ±0,49	0,12 ^a ±0,00	2,57 ^{bcd} ±0,41	0,06 ^a ±0,00	2,85 ^b ±0,08
C80	6,78 ^a ±0,09	2,17 ^{ab} ±0,50	54,85 ^d ±0,23	0,12 ^a ±0,02	3,28 ^{ab} ±0,34	0,05 ^a ±0,00	2,80 ^b ±0,04

En una misma columna letras desiguales difieren significativamente para la prueba de comparación de medias de Duncan con una $p \leq 0,05$.

La conductividad eléctrica es un parámetro muy relacionado con el contenido de sales disueltas y de la disponibilidad de nutrientes potenciales en un sustrato. Como se puede apreciar las formulaciones con biocarbón disminuyen esta propiedad, indicando una modificación ligera de esta propiedad química, lo cual puede ser favorable para la reducción de la salinidad; a pesar que en ninguno de los sustratos los valores de conductividad fueron superiores a los límites ($>3,5 \text{ S cm}^{-1}$, Warncke y Krauskopf, 1983) considerados como salinos. A su vez, de acuerdo a MINAGRI (1984) pueden calificarse todos los sustratos como no salinos y los valores se encuentran dentro del intervalo adecuado recomendado por Noguera *et al.*, (2003) para el desarrollo vegetal.

Al ser el biocarbón un material de naturaleza orgánica fundamenta su uso como un componente del sustrato, el cual además contribuye a la mejora de la estructura del espacio poroso, disminuye la densidad e incrementa la humedad, lo que trae consigo una mejor permeabilidad (Fuentes y Oropeza, 1996) en particular cuando se formulan mezclas con este.

El contenido de elementos nitrógeno, calcio y potasio resultó menor en biocarbón y mayor en cachaza, las mezclas presentaron valores semejantes a sus componentes mayoritarios. Sin embargo, la composición de sodio fue similar en todos los sustratos.

2.4.5 Caracterización física de los sustratos

El análisis de las propiedades físicas (Tabla 10) indicó diferencias significativas entre los sustratos, influenciado por las diferentes proporciones de biocarbón.

Tabla 10. Valores medios y desviación típica de las propiedades físicas de los sustratos

Sustrato	DA (g mL ⁻¹)	DMP (mm)	RH (%)
BC	0,26±0,02 ^f	0,34±0,02 ⁱ	68,73±1,25 ^a
T	0,62±0,02 ^a	1,03±0,02 ^a	42,10±1,60 ^f
C	0,55±0,01 ^b	1,00±0,06 ^b	53,54±1,15 ^e
T20	0,32±0,01 ^e	0,37±0,01 ^g	64,63±0,67 ^b
T50	0,46±0,01 ^c	0,61±0,01 ^e	57,34±1,53 ^d
T80	0,57±0,01 ^b	0,90±0,02 ^c	52,94±1,42 ^e
C20	0,32±0,02 ^e	0,42±0,01 ^h	65,49±1,60 ^b
C50	0,44±0,03 ^d	0,46±0,01 ^d	59,20±1,14 ^c
C80	0,43±0,02 ^d	0,89±0,01 ^c	58,36±1,04 ^{cd}

En una misma columna letras desiguales difieren significativamente para la prueba de comparación de medias de Duncan con una $p \leq 0,05$.

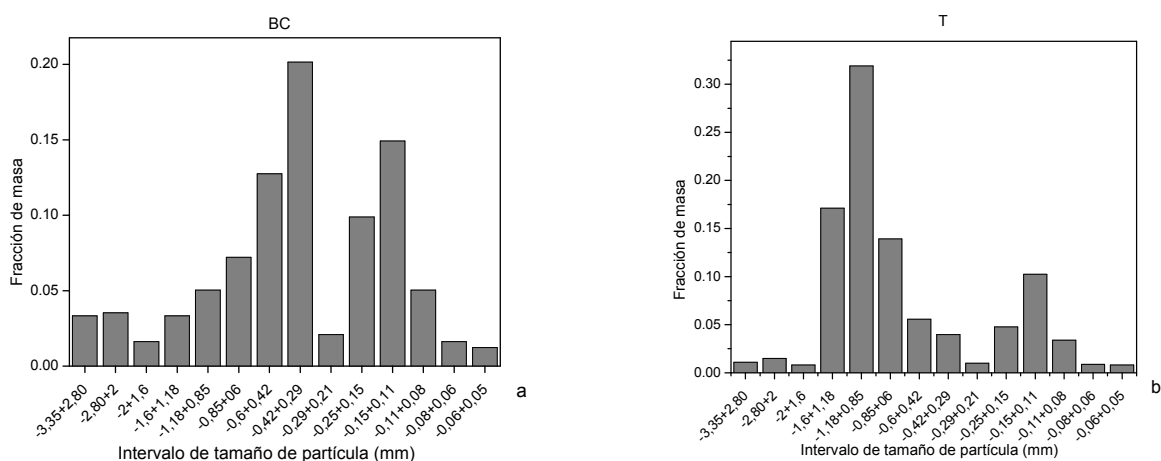
Leyenda: densidad aparente (DA), diámetro medio de partículas (DMP), retención de humedad (RH) de los sustratos

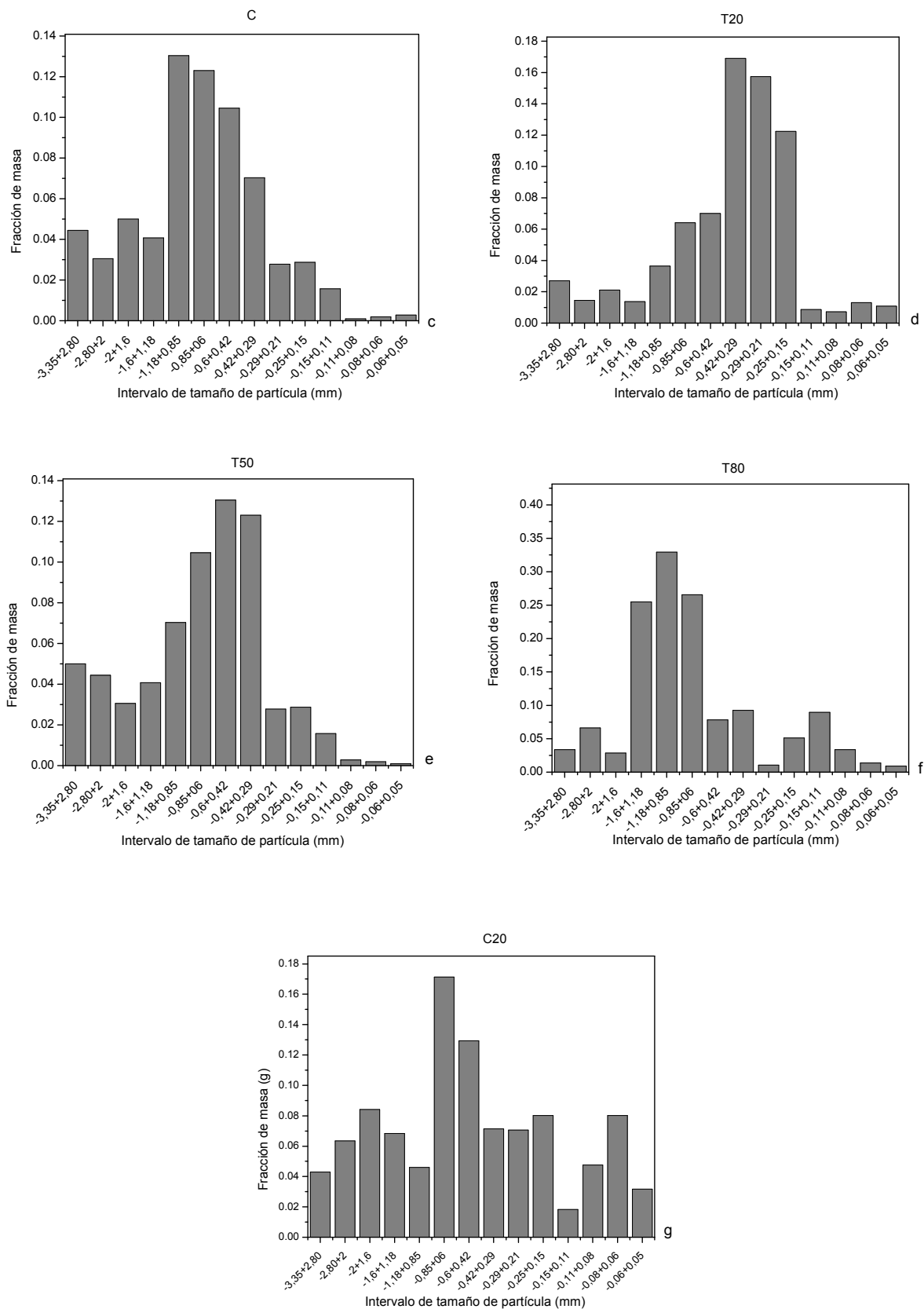
Los valores más bajos DA y DMP correspondieron al biocarbón lo que condiciona los valores más altos para la RH, lo cual está dado por la presencia de partículas pequeñas que hacen que disminuya la porosidad total y aumente la capacidad de retención de agua al disminuir el tamaño de los poros interpartícula (Ansorena, 1994). Las mezclas por su parte mostraron valores intermedios al de los constituyentes individuales, lo que evidenció que las combinaciones con biocarbón empleadas influyeron en todas las propiedades físicas. Con relación a la densidad aparente, Guzmán (2003) sostiene que

valores menores de $0,2 \text{ g mL}^{-1}$ es buena, sin embargo Ansorena (1994) argumenta que estos pueden llegar a ser cercanos a $0,4 \text{ g mL}^{-1}$. En los sustratos donde el biocarbón se encuentra al 20 % y 50 % se alcanzan los niveles idóneos.

Acerca de la retención de humedad, Abad *et al.*, (1999) citado por Guzmán (2003) expone que los sustratos que retengan al menos el 50% de humedad son apropiados para el desarrollo de las plántulas en tubetes. De forma general, todos los sustratos satisfacían con dicha condición con excepción de T y en aquellos resultantes de las combinaciones con biocarbón se modificó dicha propiedad positivamente.

Como se aprecia en la Figura 10 (a,b,c,d,e,f,g,h,i) los sustratos individuales de T y C presentan una mayor fracción en los intervalos de mayor diámetro promedio de partículas, y el biocarbón posee una distribución más homogénea a intervalos de menores tamaño de partículas. La adición de biocarbón proporciona una nueva distribución para cada sustrato donde se incorporan fracciones correspondientes en su mayoría a menores tamaños de partícula. Por tanto, esto puede ser una de las causas de la mayor retención de humedad.





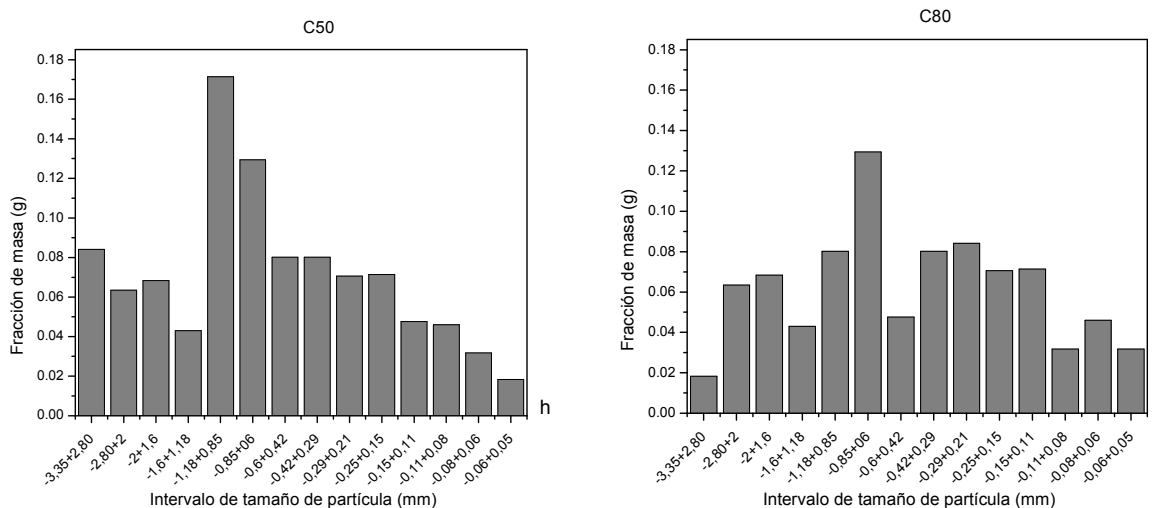


Figura 10. Distribución del tamaño de las partículas en los sustratos estudiados

La relación entre dichas propiedades se comprobaron en la matriz de correlación de Pearson (Tabla 11) donde las correlaciones fueron altamente significativas ($p \leq 0,01$) y las más correlacionadas fueron DA y RH, por lo que puede simplemente determinar la DA para tener un indicador de la posible RH de un sustrato en la práctica.

Tabla 11. Matriz de correlación de Pearson para las variables físicas

	DMP	RH	DA
DMP	1,000	-0,884(**)	0,931(**)
RH		1,000	-0,943(**)
DA			1,000

** significativa para $p \leq 0,01$

Leyenda: Densidad aparente (DA), diámetro medio de partículas (DMP), retención de humedad (RH)

2.4.6 Análisis de las propiedades relativas al destubetado, la estabilidad del cepellón y la arquitectura radical

El análisis de correspondencia mostró una correlación significativa ($p \leq 0,05$) entre los sustratos y las variables destubetado, estabilidad del cepellón y arquitectura radical (Tabla 12), con valores de inercia total mayores que uno.

Tabla 12. Resumen del análisis de correspondencia

Destubetado						
Dimensión	Valor propio	Inercia	Chi-cuadrado	Sig.	Proporción de inercia	
					Explicada	Acumulada
1	0,944	0,891			0,583	0,583
2	0,799	0,638			0,417	1,000
Total		1,529	137,6	0,000	1,000	1,000
Estabilidad del cepellón						
1	0,961	0,923			0,660	0,660
2	0,690	0,476			0,340	1,000
Total		1,399	125,889	0,000	1,000	1,000
Arquitectura radical						
1	0,960	0,921			0,534	0,534
2	0,896	0,803			0,466	1,000
Total		1,724	155,194	0,000	1,000	1,000

En la Figura 11 se puede apreciar que a un fácil destubetado estuvieron asociados los sustratos BC, T20, T50, C50 y C80; medio a C y T80 y difícil T, por lo que se puede concluir que BC como acondicionador incide favorablemente en esta propiedad.

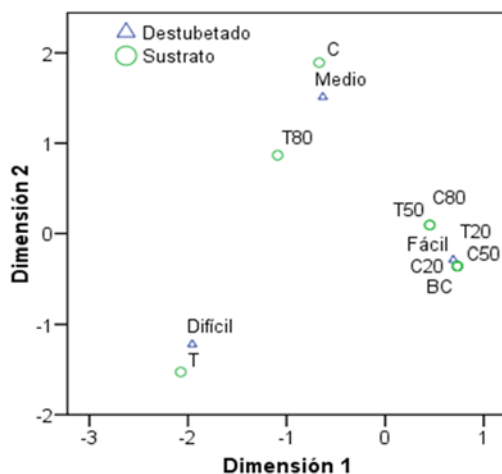


Figura 11. Representación en dos dimensiones de la relación entre los niveles del destubetado y los sustratos

En la Figura 12 se puede apreciar que proporciones de BC del 80 % disminuye la estabilidad del cepellón tanto en turba como en cachaza, esto a su vez reafirma el uso de biocarbón solo como acondicionador.

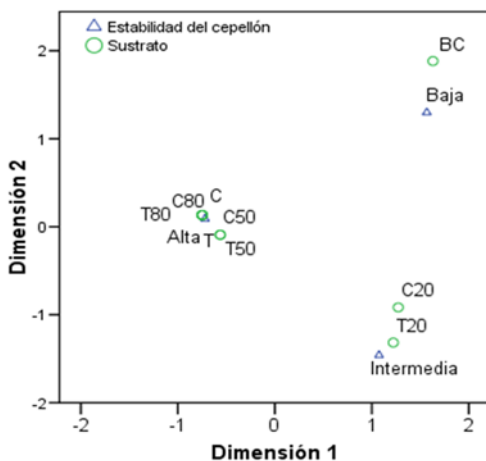


Figura 12. Representación en dos dimensiones de la relación entre los niveles de estabilidad del cepellón y los sustratos

La arquitectura radical resultó buena para la mayoría de los sustratos (Figuras 13 y 14 a, b y c), excepto T que se consideró mala lo cual indica que la presencia de BC favorece el desarrollo del sistema radical.

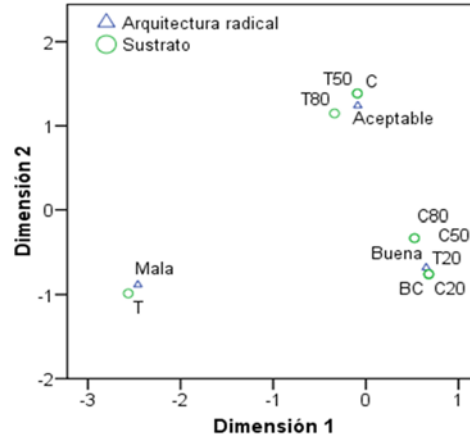


Figura 13. Representación en dos dimensiones de la relación entre los niveles de arquitectura radical y los sustratos



Figura 14. Arquitectura radical. (a) buena, (b) aceptable, (c) mala

El destubetado es una propiedad física asociada al desarrollo radical y las propiedades físicas de los sustratos. Un menor grado de desarrollo del sistema radical puede disminuir la estabilidad del cepellón.

Castillo *et al.*, (2006) en la evaluación de diferentes sustratos compuestos por cachaza como elemento principal en la producción de plantas de *Eucaliptus grandis* demostraron que las plantas con una mayor colonización de las raíces sobre el sustrato presentan

una menor resistencia al destubetado. Estos autores refieren que las variables destubetado, estabilidad del cepellón y arquitectura radical están estrechamente relacionadas entre sí, las cuales se deben tener en cuenta a la hora de estudiar los sustratos, pues del buen comportamiento de ellas depende en gran medida el éxito de la plantación.

Luego, el empleo de biocarbón como componente de los sustratos mejora la mayoría de las propiedades físicas e incide positivamente en las propiedades químicas, en este caso los sustratos con mejores características físico-químicas para el desarrollo de plántulas son aquellos donde el biocarbón está al 50 % o más, en particular las mezclas con cachaza (C50 y C80).

CONCLUSIONES PARCIALES

- El biocarbón presentó un efecto acondicionador de las propiedades físicas y químicas en turba y cachaza con una disminución de la densidad y aumento de la retención de humedad de los sustratos.
- Las mejores propiedades químicas y físicas en los sustratos compuestos por biocarbón con cachaza en la proporción 50:50 % y 20:80 % (C50 y C80) indican su potencial para la producción de plantas en tubetes.

CAPÍTULO III

CAPÍTULO III

EFFECTO DEL BIOCARBÓN COMO ACONDICIONADOR DE SUSTRATOS A TRAVÉS DE PARÁMETROS MORFOFISIOLÓGICOS DE PLÁNTULAS DE *Talipariti* *elatum* (Sw.) Fryxell

3.1 INTRODUCCIÓN

Es de vital importancia que los sustratos empleados para la producción de plantas forestales garanticen un buen desarrollo del material vegetal plantable. Por lo que, una tarea diaria es la búsqueda de nuevos materiales o combinaciones que permitan la obtención de plantas con características morfológicas y fisiológicas que le reporten ventajas para su supervivencia. Para el establecimiento de los estándares de calidad es importante el estudio de las relaciones hídricas de las plantas así como para el entendimiento de su adaptación a los ambientes nuevos (Kramer, 1974).

El balance de agua puede ser analizado mediante el potencial hídrico, el que relaciona dos eventos principales; el transporte a través de las membranas celulares y el segundo se usa con frecuencia como una medida del estado hídrico de la planta, el cual raramente es cero, debido a las continuas pérdidas de agua por transpiración. Un potencial hídrico muy bajo puede conducir a la inhibición de la división celular, de la síntesis de pared y de proteínas, la acumulación de solutos, el cierre de los estomas y la inhibición de la fotosíntesis (Taiz y Zeiger, 2006).

La tolerancia a bajo contenido de agua (ambiente estresante) está condicionada al genotipo y al desarrollo de mecanismos anatómicos y fisiológicos que regulan la respuesta de la planta para soportar la falta de agua. La planta autocontrola los dos componentes del potencial hídrico: la capacidad de ajuste osmótico y la elasticidad de las paredes celulares. El primero consiste en la aptitud de la planta de transportar o

sintetizar solutos dentro de la célula, lo que le permite mantener la turgencia aún con bajos contenidos de agua, mientras que el segundo contribuye al mantenimiento de dicha turgencia. Aunque la cantidad de agua retenida sea baja, la célula se mantiene turgente mientras más elástica sea esta (Levitt, 1980; Shackel, 1997; Warwick y Thukten, 2006). Esto permite mantener el potencial de presión en valores superiores a cero, es decir, al punto de pérdida de turgencia, con escasez de agua, lo que incrementa el potencial hídrico y, consecuentemente, disminuye el estrés sufrido, por lo tanto, tanto la capacidad de ajuste osmótico como la elasticidad de la pared permiten a la planta la turgencia celular con contenidos de agua bajos, y así, mantener la capacidad de crecimiento y fotosíntesis. Otro aspecto a considerar es el estado nutritivo de las plantas debido a que este afecta marcadamente la resistencia al estrés y determina la morfología, en especial para volúmenes tan limitados como los que proporcionan los tubetes (Rook, 1991). Los viveros deben garantizar no solo los sustratos apropiados con buenos aportes nutricionales (Landis, 1985), sino unas atenciones y regímenes de manejo del riego que permitan que las plantas desarrollen mecanismo para su adaptación.

El objetivo del presente capítulo fue **evaluar el efecto del biocarbón como acondicionador sustratos a través de parámetros morfofisiológicos de *Talipariti elatum* (Sw.) Fryxell.**

3.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.2.1 Atributos morfológicos

La calidad morfológica de una planta hace referencia a un conjunto de caracteres o atributos en estándares dados, tanto de naturaleza cualitativa como cuantitativa relativos a la forma y estructura de la planta. La morfología de una planta cultivada en tubetes en un vivero forestal es el resultado de las características genéticas, las condiciones ambientales del vivero y las prácticas de cultivo empleadas, como la fecha de siembra, la densidad de cultivo, el tipo de contenedor, el grado de sombreado, el régimen de fertilización y riego, las podas aéreas, entre otras (Mexal y Landis, 1990).

Se han empleado multitud de atributos morfológicos cuantitativos para caracterizar la calidad de una planta (Ritchie, 1984; Thompson, 1985; Mexal y Landis, 1990; Villar, 2003). Los más utilizados han sido la altura de la parte aérea, el diámetro del cuello de la raíz y los pesos secos de la raíz y la parte aérea (Chavassee, 1980; Puttonen, 1997; South, 2000), todos ellos descriptores del grado de desarrollo de las partes aérea y radical. Además, se han usado índices o relaciones morfológicas, que son combinaciones de dos o más atributos morfológicos como por ejemplo la relación entre el peso seco de la parte aérea y la radical, el índice de Dickson y la esbeltez (cociente entre la altura y el diámetro en el cuello de la raíz); aunque es válido señalar que este último se describe como atributo importante para regular la densidad en los viveros manteniendo constantes el resto de las variables. Estos índices aminoran las limitaciones interpretativas que los atributos morfológicos poseen al considerarlos de forma individualizada, sobre todo, cuando se analiza el equilibrio entre el desarrollo de la parte aérea o transpirante y la radical o absorbente (Thompson, 1985).

Existen otros criterios tomados en consideración como atributos de calidad morfológica de plantas forestales cultivadas en viveros: morfología del sistema radical, peso seco, volumen, longitud, arquitectura (Thompson, 1985; Romero *et al.*, 1986; Brissette *et al.*, 1991; Dey y Parker, 1997; Navarro y Calvo, 2002; Villar, 2003).

3.2.2 Atributos fisiológicos

3.2.2.1 Relaciones hídricas

El estado del agua en la planta durante el arraigo es más importante cuanto más dependa la especie de la fotosíntesis y menos de las reservas acumuladas para reiniciar el crecimiento radical, al ser la actividad fotosintética dependiente en gran parte del potencial hídrico en la planta (Burdett, 1990). A su vez, los componentes del potencial hídrico (potencial osmótico y de presión) son los involucrados en la respuesta específica al estrés y están estrechamente relacionados con los procesos fisiológicos. El potencial y sus componentes pueden variar en minutos, pero la capacidad de regularlos es una condición intrínseca de su genotipo derivada de su capacidad de tolerar la sequía, menos cambiante en el tiempo (Taiz y Zeiger, 2006).

Según Turner (1986), otra propiedad relacionada con la capacidad de tolerar la sequía es la elasticidad de la pared celular, ya que permite el mantenimiento de la turgencia celular. Las plantas que toleran condiciones de déficit hídrico tienen respuestas morfo-fisiológicas que les permiten sobrevivir bajo estas condiciones. La capacidad de una planta para mantener su estado hídrico, a medida que disminuye la disponibilidad de agua, se refleja en el potencial hídrico, en el contenido hídrico relativo, en el potencial de solutos de los tejidos, en el ajuste osmótico y en el ajuste elástico a través del módulo de elasticidad.

La planta desarrolla fundamentalmente dos mecanismos de resistencia a la sequía: uno relacionado con la tolerancia y otro a la capacidad de evadir dicha situación. Entre los de evasión se encuentran la regulación de las pérdidas por transpiración a través de la apertura y cierre de los estomas, disminución de la transpiración cuticular y la caída de las hojas y la extensión radical (Burdett, 1990). Los mecanismos de evasión están destinados a retrasar la deshidratación de la planta para evitar llegar a un déficit hídrico. Los cambios en el balance hídrico celular constituyen una de las causas principales de las alteraciones en la fotosíntesis y en el crecimiento. La disminución de la fotosíntesis se atribuye principalmente al cierre estomático, aunque puede ser que el efecto perjudicial de la deshidratación en el metabolismo celular se deba a otros factores no estomáticos (Kozlowski *et al.*, 1991; Kramer y Boyer, 1995; Lawlor y Cornic, 2002).

En diversas especies uno de los factores más importantes en condiciones de déficit hídrico es la reducción en: fotosíntesis neta, conductancia estomática y transpiración (Peña *et al.*, 2004).

3.2.3 Métodos para medir el estado hídrico de las plantas

El estado hídrico en las plantas se puede describir cuantitativamente mediante el potencial hídrico. Este factor controla y explica el movimiento del agua en el continuo suelo-planta-atmósfera, así como entre células, tejidos y órganos. Los tres instrumentos más importantes que se utilizan para la medida del potencial hídrico y sus componentes son el psicrómetro de termopares, la cámara de presión y la sonda de presión (Azcón y Talón, 2001).

El psicrómetro de termopares: se basa en el principio de que la presión de vapor relativa de una disolución, o muestra de material vegetal, se haya relacionada con su potencial hídrico. La muestra de material vegetal se coloca en una cámara herméticamente cerrada; al cabo de un tiempo de equilibrio generará una presión de vapor relativa, o humedad relativa en la cámara, equivalente al potencial hídrico del tejido. Una de las razones de que se utilice la psicrometría de termopares para la determinación del potencial hídrico y sus componentes es que esta técnica se puede usar en cualquier parte del sistema suelo-planta. Además, solo se necesita una pequeña porción de tejido; esto permite muestrear una hoja o raíz a medida que se somete la planta a diferentes condiciones. Los psicrómetros de termopares se han utilizado en hojas, tallos, raíces, nódulos de leguminosas, partes florales, polen y semillas en desarrollo.

La cámara de presión: Scholander *et al.*, (1965) desarrollaron una técnica para medir el potencial hídrico en unidades de presión. El método consiste en aplicar presión sobre una hoja cortada hasta que aparece el agua en el extremo seccionado del tallo o del pecíolo. Se interpreta que la presión positiva aplicada a la hoja corresponde a la presión negativa o tensión con la cual el agua estaba retenida en el interior del tallo antes de cortarse. Una ventaja de la cámara de presión es que mide rápidamente el potencial hídrico, y también se puede utilizar para medir la relación presión-volumen del tejido vegetal. Si se aplica presión adicional por encima de la presión de equilibrio inicial y se determina el contenido hídrico relativo, de manera progresiva se puede establecer una curva presión-volumen. Estas curvas permiten la determinación de un amplio espectro de parámetros hídricos en los tejidos: contenido hídrico total, relación peso turgente/peso seco, contenido hídrico relativo, contenidos hídricos apoplástico y simplástico, contenido hídrico simplástico relativo, presión osmótica a plena turgencia, presión osmótica a turgencia cero, contenido

hídrico relativo a turgencia cero, módulo de elasticidad promedio, isothermas de potencial hídrico, diagrama de Höfler (Azcón y Talón, 2001).

La sonda de presión: Los métodos convencionales, tales como la cámara de presión y los psicrómetros, determinan el potencial hídrico promedio del tejido completo, independientemente de que existan diferentes tipos de células. Además, dichos métodos requieren equilibrio de flujo hídrico en el interior del tejido y suponen que las membranas celulares son idealmente semipermeables a los solutos. En muchos casos, estas suposiciones no han sido comprobadas, y esto puede provocar errores, tanto en la medida como en la interpretación de los resultados. Además la cámara de presión y los psicrómetros no son adecuados para medir la cinética del movimiento de agua ni para evaluar las cantidades de agua transportada en las diferentes vías de un tejido complejo. En contraste con estos métodos la técnica de sonda de presión permite determinar los parámetros de relaciones hídricas a nivel celular.

3.2.4 Nutrición mineral

Los nutrientes minerales son elementos incorporados principalmente en forma de iones inorgánicos que entran a través del sistema radical de la planta. La gran área superficial de las raíces y su capacidad para absorber nutrientes minerales a bajas concentraciones en el suelo hacen de la absorción mineral un proceso muy eficaz. Tras la absorción por las raíces, los nutrientes minerales son distribuidos a diferentes partes de la planta para su utilización en importantes funciones biológicas. Otros organismos, como hongos micorrízicos y bacterias fijadoras de nitrógeno, participan con frecuencia en los sistemas radicales en la adquisición de nutrientes (Taiz y Zeiger, 2006).

El material plantable requiere de un contenido equilibrado y en cantidad suficiente de nutrientes para garantizar el traslado a plantación con las reservas minerales suficientes

para garantizar el desarrollo de sus funciones de arraigo y crecimiento postrasplante (Landis, 1985).

3.2.4.1 Uso de vectores para diagnóstico nutricional

La interpretación de los resultados del análisis de tejido vegetal en especies forestales, ya sea con fines de diagnóstico nutricional o investigación científica, suele ser una tarea complicada (Timmer, 1991a; López *et al.*, 2009). En el ámbito forestal, una de las técnicas de interpretación de análisis vegetal que ha tenido un creciente auge y aceptación durante los últimos años, especialmente en el medio científico, es la denominada “análisis de vectores”, desarrollada por Timmer y Stone (1978). La derivación para interpretar los vectores se basa en la teoría relacionada con los efectos de dilución y concentración nutricional que ocurren en cualquier sistema vegetal, como consecuencia de la producción de materia seca (Timmer, 1991b; Mengel y Kirkby, 2000). De acuerdo con esta teoría, la concentración de nutrimentos en los tejidos vegetales está en función tanto de su disponibilidad en el suelo o sustrato, como de las tasas de crecimiento del vegetal. Cuando las tasas de crecimiento son bajas, los nutrimentos se encuentran en los tejidos en concentraciones que pueden ser superiores al nivel crítico, aun cuando el nutrimento se encuentre disponible en bajas concentraciones en el suelo. Por el contrario, cuando las tasas de crecimiento son altas, los nutrimentos, especialmente aquellos cuya disponibilidad en el suelo es baja, se diluyen dentro de los tejidos (López y Estañol, 2007). Otra teoría utilizada para interpretar los vectores de Timmer es la ley del mínimo de Liebig (Larcher, 1995), la cual postula que el vegetal crece a una tasa tan alta como lo permita el factor del crecimiento que se encuentre menos disponible. Este factor puede ser un nutrimento, la temperatura ambiente o del suelo, la humedad ambiental o del suelo, entre

otras. Múltiples investigaciones señalan que el factor limitante es alternante y que una vez que este se corrige surge otro nuevo (Sumner, 1977 a y b).

3.3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.3.1 Ubicación del experimento

Para la evaluación del efecto del biocarbón como acondicionador de sustratos en parámetros morfofisiológicos de *T. elatum* se realizó un ensayo experimental en casa de cultivo, ubicada en las áreas del Laboratorio de Suelos perteneciente al Ministerio de la Agricultura, municipio Pinar del Río (22°25'21,9" N; 83°40'33,6" E).

3.3.2 Procedencia, almacenamiento y características del material de reproducción

Se utilizaron semillas de la Estación Experimental Agroforestal Viñales, recolectadas en el mes de enero de 2011 y posteriormente almacenadas hasta el momento de la siembra en el frigorífico de Consolación del Sur, establecimiento No. 102, de la Empresa Nacional de Frigorífico subscripta al Ministerio de Comercio Interior, Pinar del Río. Previo a la siembra se realizó un ensayo de germinación con resultados del más del 90 % de semillas germinadas en todos los sustratos.

3.3.3 Tratamiento pregerminativo y siembra

Se realizó tratamiento pregerminativo a las semillas recomendado por Cobas (2001), que consistió en la escarificación mecánica con papel de lija de grano medio durante 10 minutos. La siembra se realizó el 28 de septiembre del 2012, se colocaron tres semillas por envase, para luego dejar la planta más vigorosa. El riego fue manual, inicialmente dos veces al día hasta los 50 días, posteriormente se disminuyó la frecuencia de riego a uno diario y finalmente cada dos días.

3.3.4 Evaluación de la dinámica de crecimiento

Se evaluó la dinámica de crecimiento para las variables altura y diámetro cada siete días, a partir de los 42 días posteriores a la siembra hasta los 84 días, para lo cual se emplearon 30 plantas por tratamiento.

3.3.5 Medición de variables morfológicas

Las variables morfológicas utilizadas en el análisis, medidas a los 84 días posteriores a la siembra, fueron altura, diámetro del cuello de la raíz, peso seco aéreo, peso seco de la raíz principal y peso seco de las raíces finas, sugeridas por Mexal y Landis (1990) y Contardi (1999), para lo cual se emplearon 12 plantas por cada una de las nueve variantes de sustratos.

La altura se midió desde el cuello de la raíz hasta el extremo de la yema apical, utilizándose una regla graduada de 0,1 mm de precisión. Para la medición del diámetro del cuello de la raíz se utilizó el pie de rey, con una precisión de 0,002 mm. El peso seco aéreo y de las raíces se determinó una vez colocadas las muestras en la estufa a 60 °C hasta obtener masa constante, con balanza analítica Sartorius AG GOTTINGEN SP61S con 0,0001 g de precisión.

3.3.6 Índices y relaciones morfológicas

Relación parte aérea y parte radical

La relación parte aérea/raíz se estimó como el cociente entre el peso seco de la parte aérea en gramos y el peso seco de la raíz en gramos.

Relación altura parte aérea y masa seca de la parte aérea

Esta relación se obtuvo por la división de la altura de la parte aérea por la materia seca de la parte aérea.

Índice de calidad de Dickson

El índice de calidad de Dickson (ICD) se determinó a partir de la ecuación (11).

$$ICD = \left[\frac{P_{st}}{\frac{h}{dcr} + \frac{P_{sa}}{P_{sr}}} \right] \quad (11)$$

Siendo:

Pst: peso seco total (g)

H: altura (cm)

dcr: diámetro del cuello de la raíz (mm)

Psa: peso seco aérea (g)

Psr: peso seco radical (g)

3.3.7 Determinación de variables fisiológicas

Parámetros hídricos

Para evaluar los parámetros relacionados con el funcionamiento hídrico de la especie se construyeron curvas presión–volumen. Se realizaron 12 curvas por sustrato lo cual equivale a 108 curvas (12 individuos x 9 variante). Las curvas se elaboraron siguiendo la técnica desarrollada por Tyree y Hammel (1972) y Turner (1986) y a partir de las cuales, se determinaron los componentes del potencial hídrico (Ψ_w), según metodología descrita por Azcón y Talón (2001): contenido hídrico relativo en el punto de pérdida de la turgencia (CHR^0), potencial osmótico a cero turgencia (Ψ_s^0), potencial osmótico a plena turgencia (Ψ_s^{100}) y módulo de elasticidad de la pared celular (ϵ). La Figura 15 muestra los parámetros hídricos a partir de la construcción de las curvas presión–volumen.

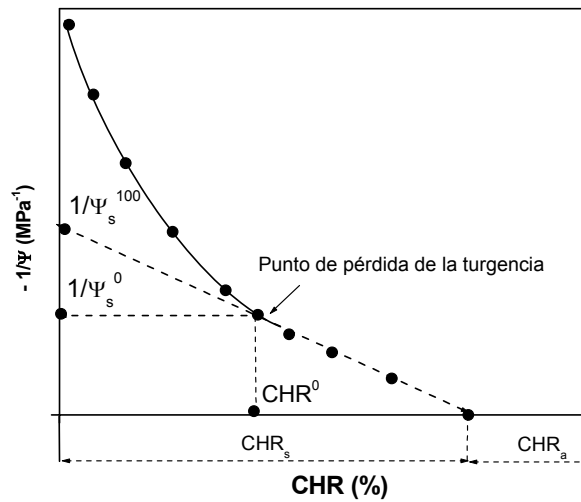


Figura 15. Curva presión-volumen utilizada para determinar los componentes del potencial hídrico. Fuente: Adaptado de Azcón y Talón (2001)

Para la construcción de las curvas presión-volumen (Anexo 2) las plantas fueron sometidas a un período de rehidratación con agua destilada y en la oscuridad. Se realizaron medidas sucesivas de Ψ_w con la cámara de presión (Model 1000, PMS Instruments, Corvallis, USA), antecedida por la pesada de las muestras. Se efectuaron medidas de Ψ_w , hasta obtener un número suficiente de puntos en la zona recta de la curva; finalmente el peso seco se determinó en estufa a 80 °C hasta peso constante. Para las pesadas se utilizó balanza analítica Sartorius AG GOTTINGEN SP61S con 0,0001 g de precisión.

El contenido hídrico relativo se calculó por la expresión:

$$CHR = \frac{P_f - P_s}{P_t - P_s} * 100 \quad (12)$$

Donde: P_f , representa el pesos fresco; P_s , peso seco; P_t , peso turgente

El peso turgente se estimó a partir de la linealidad existente entre Ψ_w y el peso fresco, tomando los datos correspondientes a las primeras mediciones que ofrecieron un mayor grado de correlación, según criterios de Kubiske y Abrams (1991). Gráficamente se determinó el punto de pérdida de turgencia para el cual el $\Psi_w = \Psi_s$ ($\Psi_p = 0$), que corresponde al punto en que la curva se hace lineal.

El potencial osmótico a plena turgencia (Ψ_s^{100}), se estimó mediante la extrapolación de la zona lineal de la curva presión–volumen, a partir del punto de pérdida de turgencia hasta el valor de $1/\Psi_w$ correspondiente al 100% del contenido de agua del tejido.

El potencial osmótico a turgencia cero (Ψ_s^0), corresponde al valor del potencial en el punto de inicio de la plasmólisis.

Además se determinó el módulo de elasticidad de la pared celular (ε), expresado en megapascuales (MPa) mediante la ecuación propuesta por Robichaux (1984), aplicada a los cinco o seis primeros puntos de la curva P-V hasta llegar a la marchitez, dada por:

$$\varepsilon = \frac{dP}{dCHR} (CHR_m - CHR_a) \quad (13)$$

Siendo: $\frac{dP}{dCHR}$ la relación entre la variación del potencial de presión y el contenido hídrico relativo entre el punto de máxima turgencia y a turgencia cero.

CHR_m , contenido hídrico medio,

CHR_a , contenido hídrico apoplástico.

Diagnóstico nutricional

Para el diagnóstico nutricional se tomó un número fijo de hojas (100 hojas) cada 15 días, seleccionando aquellas que estuvieran sanas y completas (que no tuvieran mordeduras de insecto o algún daño mecánico). Se secaron a 70 °C por 48 h en estufa, luego se

pesaron en una balanza de precisión para obtener el peso seco. Las mismas se llevaron al Laboratorio de Suelos del Ministerio de la Agricultura en Pinar del Río para determinar los elementos de interés (nitrógeno, fósforo y potasio) a partir de la norma ramal (NRAG 144-2010).

Los resultados del análisis químico foliar permitieron determinar la concentración de los nutrientes de interés, mediante la cual se derivó el contenido nutricional a partir del peso seco (concentración x peso seco).

Con las variables peso seco, concentración y contenido se construyeron nomogramas vectoriales (gráfica de Timmer) de López y Alvarado, (2010).

3.3.8 Procesamiento estadístico

Para la clasificación de los sustratos a través de las variables morfológicas de la plántula se empleó un análisis discriminante. Para evaluar la relación entre las variables asociadas con los parámetros hídricos (Ψ_s^0 , Ψ_s^{100} , ε) y las propiedades físicas de los sustratos (DMP, DA, RH) se realizó la matriz de correlación de Pearson utilizando el paquete estadístico SPSS ver. 15.0 para Windows.

3.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.4.1 Dinámica de crecimiento en altura y diámetro

Como se aprecia en la Figura 16 tanto para la altura como el diámetro a partir de los 50 días aparecen los mayores incrementos (el período más activo de crecimiento), y para los 77 días comienzan a estabilizarse los incrementos, lo que pudiera estar indicando menor disponibilidad de nutrientes (ver Figuras 22 y 23) y espacio para continuar el crecimiento. En ambas curvas el sustrato con peor comportamiento resultó ser el biocarbón, seguido de los que contenían T y sus combinaciones, cachaza y los mejores resultados siempre estuvieron asociados a las combinaciones de biocarbón y cachaza (C50 y C80). Cabe señalar, que las combinaciones de turba y cachaza con biocarbón siempre fueron superiores a los sustratos de estos elementos independientes, lo que puede estar relacionado con las mejora en las propiedades físicas y químicas que le impone la presencia de biocarbón.

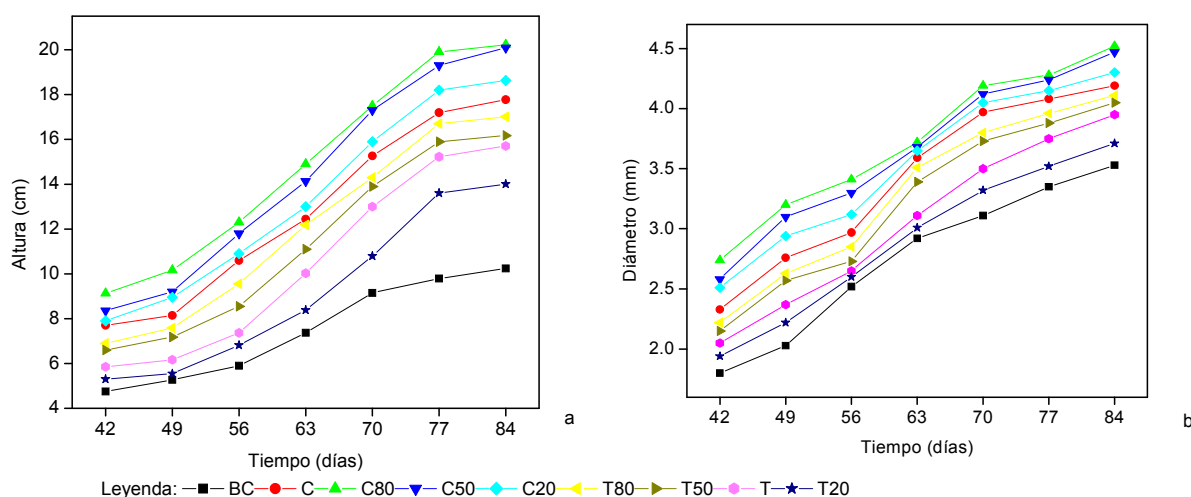


Figura 16. Dinámica de crecimiento de *T. elatum* en diferentes sustratos. (a) Altura, (b) Diámetro

El comportamiento de la dinámica de crecimiento de la especie resultó similar a los informados por Cobas (2001) y León (2010) con relación al período de mayor velocidad de crecimiento entre 70 a 90 días, las variaciones en el intervalo pudieran estar asociados por la fuente de semilla, a las condiciones ambientales del vivero, fecha de siembra, densidad de cultivo, tipo de contenedor, grado de sombreo, régimen riego, entre otros.

3.4.2 Análisis de las variables e índices morfológicos

Como se puede apreciar en la Tabla 13 existen diferencias significativas entre los sustratos empleados excepto para los sustratos C50 y C80, que resultaron tener los mejores valores en todas las variables evaluadas. No obstante, la gran mayoría de los sustratos empleados en este estudio muestran valores de altura y diámetro superiores a los obtenidos previamente por Cobas (2001) y León (2010) en la especie con sustratos más complejos desde el punto de vista de la proporciones de los componentes, además que el período en alcanzar los intervalos deseables para plantaciones se acortan en aproximadamente 41 días, lo cual indica que la posibilidad de uso de los sustratos con biocarbón.

Los sustratos C50 y C80 propiciaron el mejor desarrollo de la raíz y de la parte aérea, lo cual pudiera estar asociado a la mejora en las propiedades físicas y químicas de estas mezclas, es decir, una adecuada relación entre aire, agua y disponibilidad de nutrientes (Tabla 10) y el aumento en las tasas de acumulación de biomasa.

Tabla 13. Valores medios y desviación típica de los variables morfológicos

Sustrato	variables				
	A (cm)	D (mm)	PSA (g)	PST (g)	PSR (g)
BC	10,21±1,47 ^g	3,53±0,10 ^g	0,65±0,04 ^h	0,88±0,05 ^g	0,23±0,03 ^g
T	15,66±0,30 ^e	3,95±0,06 ^e	1,17±0,05 ^f	1,54±0,08 ^e	0,38±0,04 ^f
T20	14,04±1,17 ^f	3,69±0,09 ^f	1,05±0,08 ^g	1,41±0,09 ^f	0,36±0,03 ^f
T50	16,06±1,12 ^e	4,05±0,05 ^{de}	1,22±0,04 ^d	1,71±0,06 ^e	0,48±0,04 ^e
T80	17,00±0,52 ^d	4,11±0,08 ^{cd}	1,31±0,05 ^e	1,87±0,06 ^d	0,56±0,03 ^d
C	17,73±0,31 ^c	4,20±0,10 ^c	1,37±0,08 ^c	1,98±0,11 ^c	0,61±0,05 ^c
C20	18,58±0,34 ^b	4,30±0,07 ^b	1,43±0,05 ^b	2,07±0,06 ^b	0,64±0,03 ^b
C50	19,82±0,35 ^a	4,47±0,11 ^a	1,53±0,02 ^a	2,24±0,03 ^a	0,71±0,04 ^a
C80	20,30±0,70 ^a	4,54±0,13 ^a	1,56±0,04 ^a	2,29±0,02 ^a	0,72±0,04 ^a

Letras desiguales difieren significativamente para la prueba de comparación de medias de Duncan con una $p \leq 0,05$.

Leyenda: altura (A), diámetro (D), peso seco aéreo (PSA), peso seco total (PST), peso seco radical (PSR)

El diámetro del cuello de la raíz, es uno de los atributos morfológicos más ampliamente utilizados en la caracterización de la calidad y de pronóstico de supervivencia de la planta, por su bajo costo de medición y su capacidad predictiva de respuesta en el campo (Barnett, 1984). Esto se fundamenta en la relación que existe, entre el diámetro del cuello de la raíz y el grado de lignificación del tallo, asociado con la resistencia mecánica y las altas temperaturas de la superficie del suelo, y por otro lado con el desarrollo radical, el cual a su vez se correlaciona con otros como la masa total de la planta o la masa radical (Mexal y Landis, 1990; Peñuelas y Ocaña, 1991; Serrada, 1995).

El peso seco es una medida mucho más estable que el peso fresco, pues este último está sujeto a cambios debido a las fluctuaciones ambientales y fisiológicas (Thompson,

1985), y a la vez definen las variables morfológicas altura, diámetro, área foliar, actividad fotosintética y potencial de crecimiento radical.

La relación A/PSA es referido como una medida del grado de lignificación de la planta (Gomes, 2002), sin embargo puede ser interpretado también como un estimador de la asimilación neta fotosintética de la planta y por tanto indicaría una mayor expectativa de supervivencia; es decir los valores menores serían recomendados. En este sentido, los sustratos utilizados fueron poco diferenciados (Tabla 14) aunque entre los menores valores se encontraron las mezclas C50 y C80. Dicha relación si bien no es usada comúnmente para expresar la calidad pudiera representar una posibilidad para evaluar el grado de lignificación (Gomes, 2002; Zumkeller *et al.*, 2009), pero al mismo tiempo su propuesta como relación para evaluar la calidad de las plántulas al ser un indicador indirecto de la tasa de asimilación neta.

Tabla 14. Valores medios y desviación típica de los índices morfológicos

Sustrato	Relaciones e índices		
	A/PSA	PSA/PSR	ICD
BC	15,71±2,05 ^a	2,87±0,41 ^b	0,15±0,15 ^g
T20	13,38±1,04 ^c	3,08±0,20 ^c	0,22±0,14 ^d
T50	13,37±1,55 ^a	2,92±0,32 ^b	0,21±0,10 ^f
T	13,16±0,57 ^{bc}	2,54±0,23 ^a	0,26±0,16 ^e
T80	12,98±0,45 ^b	2,34±0,16 ^d	0,29±0,11 ^c
C	12,97±0,85 ^{bc}	2,26±0,18 ^d	0,31±0,24 ^b
C20	13,11±0,56 ^b	2,21±0,15 ^d	0,32±0,10 ^b
C50	12,96±0,20 ^{bc}	2,18±0,12 ^d	0,33±0,10 ^a
C80	12,99±0,15 ^{bc}	2,17±0,17 ^d	0,34±0,15 ^a

Letras desiguales difieren significativamente para la prueba de comparación de medias de Duncan con una $p \leq 0,05$.

Leyenda: relación entre altura y peso seco aéreo (A/PSA), relación entre parte aérea y parte radical (PA/PR), índice de calidad de Dickson (ICD).

El índice de calidad de Dickson que resulta de integrar los valores de la biomasa total, índice de esbeltez y de la relación parte aérea/raíz, muestra que los mayores valores se obtuvieron en las mezclas C50 y C80 mientras que el más bajo al BC. Este índice al combinar la información de las dos relaciones anteriores y ajustarlo por el efecto del tamaño de la planta, muestra que un aumento en el índice representa plantas de mejor calidad, lo cual implica que, por una parte, el desarrollo de la planta es grande y que al mismo tiempo las fracciones aérea y radical están equilibradas (Oliet, 2000), lo cual sostiene la selección de estos dos sustratos para la producción de plántulas. Hunt (1990) propone que el valor mínimo del ICD de 0,2 como límite para considerar plantas de calidad buena. Conforme a esto en todos los sustratos excepto en el BC se sobrepasa dicho valor. En un ensayo empleando sustratos con aserrín, Mateo *et al.*, (2011) encontró que para la producción de *Cedrela odorata* L., estos oscilaron entre 0,17 y 0,30.

La relación entre materia seca de la parte aérea y la materia seca de la raíz es considerada como un elemento eficiente y seguro para expresar las propiedades de la calidad de las plantas (Parviainen, 1981), aunque ha resultado cuestionada como relación de evaluación en un sistema de producción en tubetes (Navarro *et al.*, 2006). Generalmente para climas secos o tropicales se prefieren valores cercanos 2,0 que serían la mejor relación entre estos atributos (ver revisión en Navarro *et al.*, 2006; Brissete *et al.*, 1991). Los sustratos con cachaza y sus mezclas ofrecen los mejores valores de este índice, similares a los informados por Mateo *et al.*, 2011 en *Cedrela odorata* L.

3.4.3 Análisis discriminante para los sustratos empleados en la producción de *T. elatum*

En el análisis discriminante (Tabla 15) la primera función discriminante explica 89,9 % de la variación (correlación canónica de 0,99), la segunda función explica el 8% (correlación canónica de 0,94), ambas explican el 97,9% de la variabilidad. Las variables que más contribuyen a la diferenciación en la primera función y segunda función canónica son relativas al peso seco total y en peso seco de las raíces finas (Tabla 16) y son relativas a la asimilación neta.

Tabla 15. Estadísticos descriptivos del análisis discriminante

Función	Autovalor	% de varianza	% acumulado	Correlación canónica
1	97,535	89,9	89,9	0,995
2	8,686	8,0	97,9	0,947

La primera función distingue fundamentalmente los casos relativos a T50, C, C20, C50 y C80 (cuyos centroides están ubicados en la parte positiva) de los otros casos de BC, T20, T80 y T (que están ubicados en la parte negativa).

Tabla 16. Coeficientes estandarizados de las funciones discriminantes canónicas

	Función	
	1	2
Altura	0,319	-0,137
Diámetro	0,539	0,136
Peso seco raíz principal	0,070	-0,109
Peso seco raíces finas	0,265	1,163
Peso seco total	0,688	-0,847

El análisis de discriminante logra clasificar correctamente el 89,9% (Tabla 17) de los casos por lo que se puede discriminar los sustratos, en especial BC, T, T20, a partir de las variables utilizadas en especial de las relativas a la biomasa (Figura 17), excepto los casos correspondientes a C50 y C80, los cuales podrían suponer un mismo comportamiento para dos mezclas con biocarbón y cachaza.

Tabla 17. Resultado de la clasificación a partir de las funciones discriminantes

		Sustrato	Grupo de pertenencia pronosticado								Total
			BC	T20	T50	T	T80	C	C20	C50	C80
Original	Recuento	BC	12	0	0	0	0	0	0	0	12
		T20	0	12	0	0	0	0	0	0	12
		T50	0	0	12	0	0	0	0	0	12
		T	0	0	0	12	0	0	0	0	12
		T80	0	0	1	0	11	0	0	0	12
		C	0	0	2	0	0	6	4	0	12
		C20	0	0	0	0	0	1	11	0	12
		C50	0	0	0	0	0	0	0	10	12
		C80	0	0	0	0	0	0	0	2	12
%		BC	100.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	100.0
		T20	.0	100.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	100.0
		T50	.0	.0	100.0	.0	.0	.0	.0	.0	100.0
		T	.0	.0	.0	100.0	.0	.0	.0	.0	100.0
		T80	.0	.0	8.3	.0	91.7	.0	.0	.0	100.0
		C	.0	.0	16.7	.0	.0	50.0	33.3	.0	100.0
		C20	.0	.0	.0	.0	.0	8.3	91.7	.0	100.0
		C50	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	83.3	100.0
		C80	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	16.7	100.0

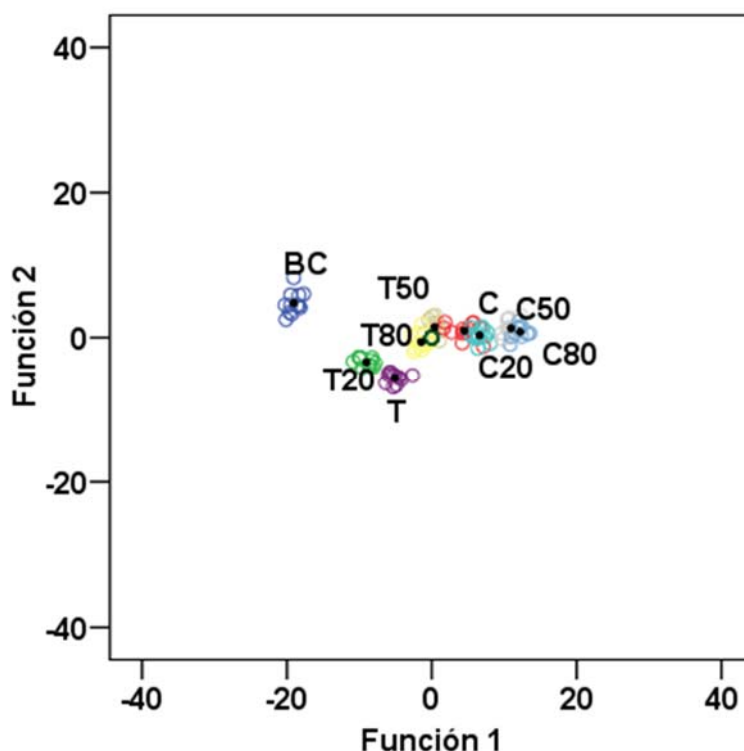


Figura 17. Diagrama de dispersión de los nueve grupos (sustratos) en las dos funciones discriminantes

Frecuentemente los análisis estadísticos empleados para la evaluación y selección de sustratos a partir de variables morfológicas se realiza a través de análisis de la varianza simple para cada una de las variables independientemente sin embargo la información obtenidas por este método es de difícil interpretación, ya que lo mejores valores se corresponden indistintamente a uno u otro sustrato (tratamiento o tipo de contenedor) (Zumkeller *et al.*, 2009; Chirino *et al.*, 2008), por lo que el análisis debe incluir la evaluación de todas o de las variables que más contribuyan al total.

El estudio permitió la clasificación a partir de variables morfológicas de los casos en cada uno de los diferentes sustratos (grupos) mediante el empleo del análisis discriminante a partir de la combinación de las variables morfológicas, obteniendo una función

discriminante donde la mayor contribución incurrió en el peso seco total, y que además facilita su propuesta como predictora para la selección del sustrato.

3.4.4 Atributos fisiológicos

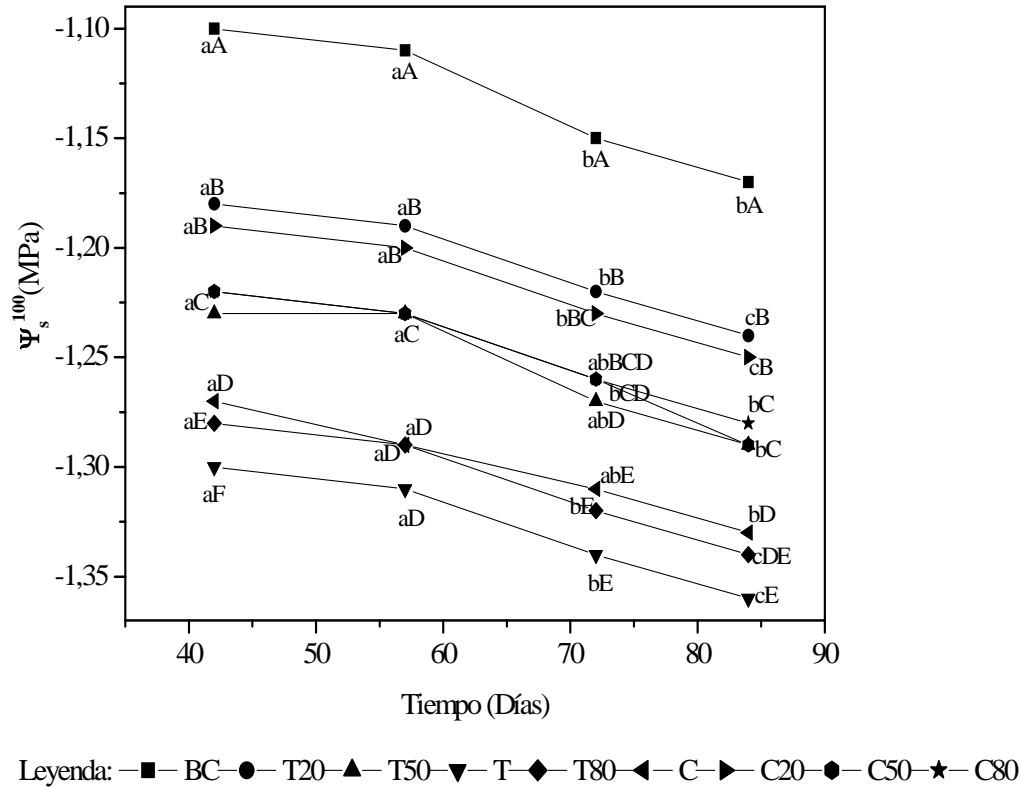
3.4.4.1 Comportamiento de los parámetros hídricos

En las Figuras 18 y 19 se muestran iguales comportamientos decrecientes (potenciales más negativos) del potencial de soluto a máxima saturación (Ψ_s^{100}) y en el punto de pérdida de turgencia (Ψ_s^0) para cada sustrato empleado durante el tiempo que se mantuvo en los tubetes. Además, para todos los sustratos existieron diferencias significativas entre el inicio y final del tiempo evaluado, todo ello estaría indicando el desarrollo de mecanismos de ajuste osmótico.

El análisis con relación a los diferentes sustratos mostró que las diferencias significativas resultaron entre los grupos C50, C80, T50 con C20, T20; y con T80, C20, y los grupos de BC y T. De forma general, el grupo C50, C80, T50 mostró valores intermedios de potencial entre BC (extremo de mayor potencial) y T (extremo menor). Los sustratos con proporciones de biocarbón iguales (ver C20, T20 y T50, C50) tienen comportamientos similares no existiendo diferencias significativas entre ellos por lo que las diferencias entre proporciones de BC determinan el desarrollo de dichos mecanismos al variar las propiedades físicas de los sustratos.

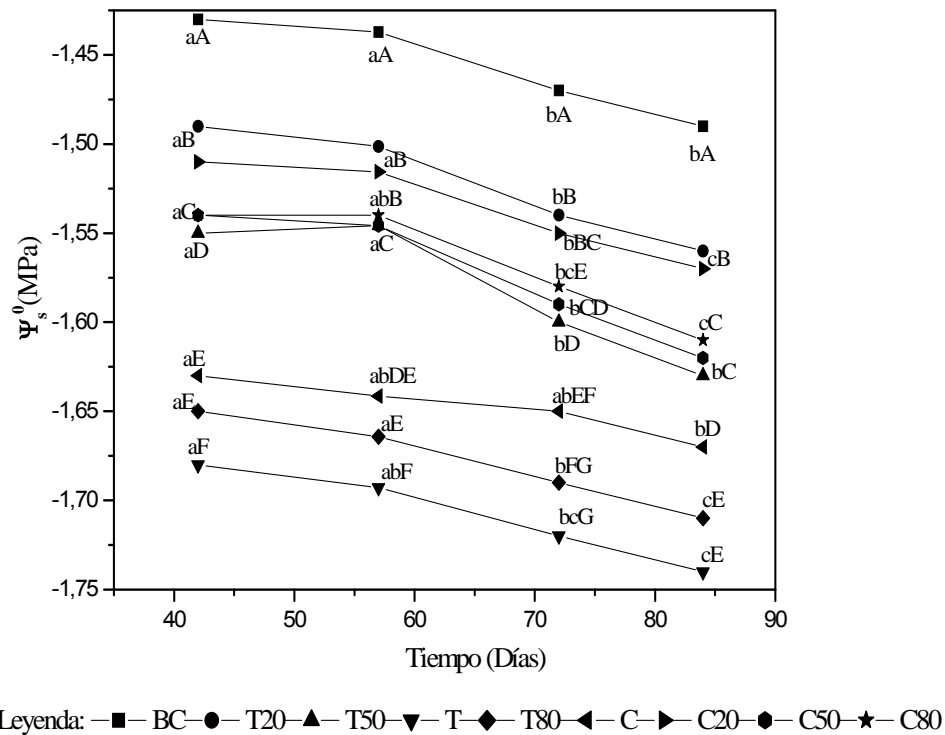
Si bien el ajuste osmótico se puede entender como la capacidad que tiene la planta para mantener la turgencia celular a bajos potenciales hídricos (Azcón y Talón, 2001) y esto es una medida de la posibilidad de desarrollo en condiciones de bajo contenidos de agua en el sitio, en este caso, al no tener iguales características físicas y químicas de los sustratos no permite inferir relaciones entre parámetros hídricos y morfológicos. Sin embargo, resultaba crucial el análisis de si la especie desarrollaba o no dichos

mecanismos de cara a su propuesta para plantación de sitios con bajo contenido de agua y para posibles estudios de riego de endurecimiento.



Letras mayúsculas desiguales corresponden a diferencias significativas entre sustratos para una misma medición. Letras minúsculas se corresponden a diferencias significativas dentro de los sustratos ($p \leq 0,05$).

Figura 18. Potencial de soluto de *T. elatum* a máxima turgencia en diferentes tiempos para cada uno de los sustratos empleados



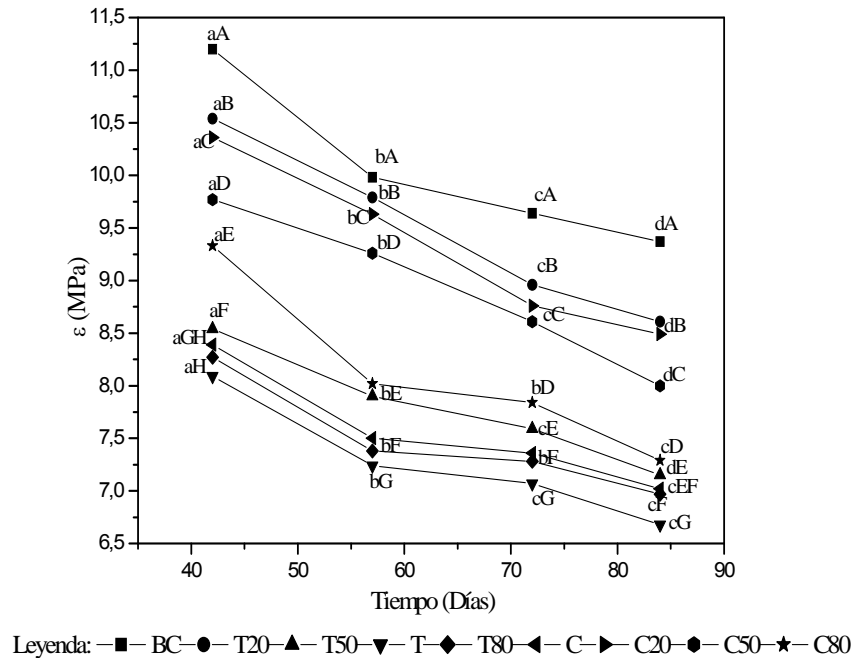
Letras mayúsculas desiguales corresponden a diferencias significativas entre sustratos para una misma medición. Letras minúsculas se corresponden a diferencias significativas dentro de los sustratos ($p \leq 0,05$).

Figura 19. Potencial de soluto de *T. elatum* a cero turgencia en diferentes tiempos para cada uno de los sustratos empleados

De forma general, en todos los sustratos, durante el período evaluado, la especie desarrolló mecanismos de ajuste osmótico con una disminución tanto Ψ_s^{100} como de Ψ_s^0 . El ajuste osmótico, como mecanismo de tolerancia, relacionado con la acumulación activa de solutos tales como azúcares solubles, ácidos orgánicos y prolina (Castellarin *et al.*, 2007; Szabados y Saviouré, 2010), induce a una disminución del potencial osmótico a plena turgencia o en el punto de inicio de la plasmólisis, permitiendo la turgencia celular

a bajos potenciales hídricos y a la vez favorecen procesos fisiológicos tales como; crecimiento celular, apertura estomática y la fotosíntesis (Deluc *et al.*, 2009, citado por Bavestrello *et al.*, 2013). Al respecto para *Cryptocarya alba* se detectaron que desarrollaba dichos mecanismos cuando estaba sometida a estrés hídrico (Donoso *et al.*, 2011)

Con relación a los valores del módulo de elasticidad de la pared celular (Figura 20) resultaron con diferencias significativas para la mayoría de los sustratos. Los mayores valores se reportaron en BC y los menores en T.



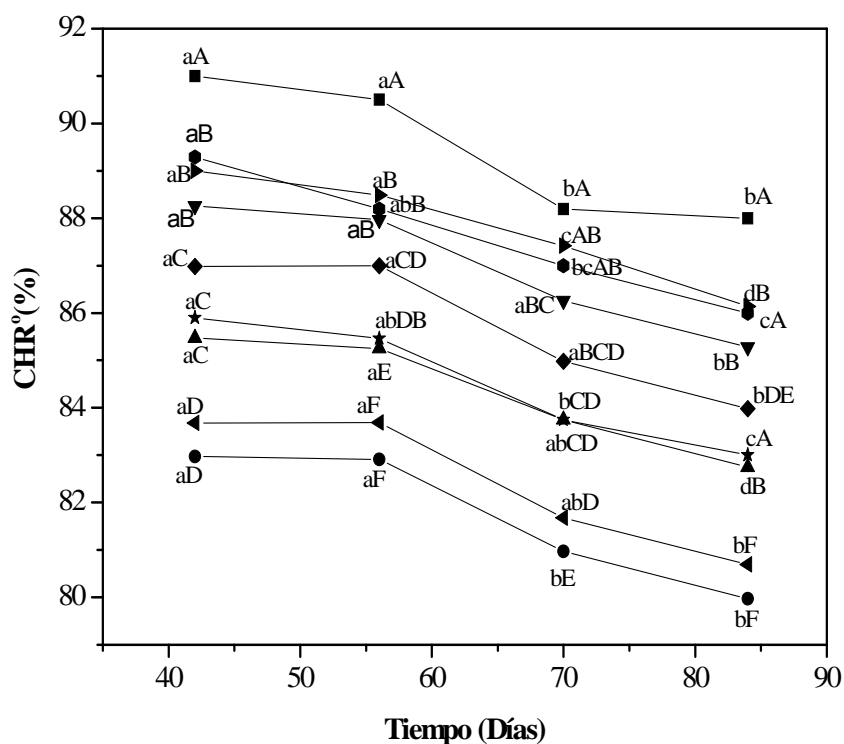
Letras mayúsculas desiguales corresponden a diferencias significativas entre sustratos para una misma medición. Letras minúsculas se corresponden a diferencias significativas dentro de los sustratos ($p \leq 0,05$)

Figura 20. Módulo de elasticidad de la pared celular de *T. elatum* en diferentes tiempos para cada uno de los sustratos empleados

El ajuste elástico es una propiedad de las paredes de las células vegetales descrito a través del módulo de elasticidad que manifiesta los cambios del potencial de turgencia en función de las variaciones en el contenido hídrico celular (Herralde 2000), por lo tanto valores bajos del módulo de elasticidad, indican una mayor elasticidad de las paredes celulares y esto a su vez permite la integridad celular (Ruiz, 1999; Lenz *et al.*, 2006). A pesar de que este resulta un aspecto poco estudiado en las especies forestales, Lenz *et al.*, (2006) informa que *Prosopis pallida* posee módulos de elasticidad de la pared de alrededor 16-24 MPa, mientras que Corcuera *et al.*, (2002) expone 11-20 MPa para el género *Quercus*. Las variaciones en los módulos de elasticidad se pueden explicar debido a factores como el tamaño celular, la composición química de las paredes (reflejado en la proporción de los diferentes componentes) o la edad de la hoja (Herralde, 2000; Salleo y Lo Gullo, 1990).

En todos los sustratos la especie objeto de estudio desarrolló paredes elásticas lo que le garantiza una mayor resistencia al estrés hídrico, con una tendencia al ajuste elástico.

En la Figura 21 se presentan los valores del contenido hídrico relativo en el punto de pérdida de la turgencia (punto de inicio de la plasmólisis), lo que representa qué cantidad de agua contiene la célula, y puede interpretarse como el agua perdida. Contenidos hídricos relativos bajos en el punto de inicio de la plasmólisis, implican mayores pérdidas de agua sin que se afecten los procesos celulares.



Leyenda: —■— BC —●— T —▲— C —▼— T20 —◆— T50 —◀— T80 —▶— C20 —●— C50 —★— C80

Letras mayúsculas desiguales corresponden a diferencias significativas entre sustratos para una misma medición. Letras minúsculas se corresponden a diferencias significativas dentro de los sustratos ($p \leq 0,05$)

Figura 21. Contenido hídrico relativo en el punto de pérdida de la turgencia de *T. elatum* en diferentes tiempos para cada uno de los sustratos empleados

Se pudo comprobar que existe una tendencia a la disminución del CHR^0 durante el período en estudio mostrando diferencias significativas en los sustratos. El mayor CHR^0 resultó en BC y menor para T, está relacionado con el sustrato y la biología de la especie.

En la Tabla 18, se muestra una fuerte correlación positiva entre los parámetros hídricos para esta especie, es decir, la especie responde aclimatándose ante cambios de disponibilidad de agua lo que justifica su alta plasticidad ecológica.

Tabla 18. Matriz de correlación entre los parámetros hídricos de la especie

	CHR^0	Ψ_s^{100}	Ψ_s^0	ϵ
CHR^0		0,800(**)	0,811(**)	0,852(**)
Ψ_s^{100}			0,947(**)	0,873(**)
Ψ_s^0				0,864(**)
ϵ				

** La correlación es significativa para $p \leq 0,01$

Leyenda: Contenido hídrico relativo en el punto de pérdida de turgencia (CHR^0), potencial de soluto a máxima saturación (Ψ_s^{100}), potencial de soluto en el punto de pérdida de turgencia (Ψ_s^0); módulo de elasticidad de la pared celular (ϵ).

En la Tabla 19 se muestra la alta correlación que existe entre las variables hídricas de la especie y propiedades físicas de los sustratos. Se encontraron correlaciones positivas entre la retención de humedad y los parámetros hídricos evaluados, lo que indicó que en aquellos sustratos de mayor retención de humedad la especie desarrolló paredes de mayor módulo de elasticidad y mayores potenciales de solutos como salida adaptativa o mecanismo de tolerancia.

Tabla 19. Matriz de correlación entre propiedades físicas de los sustratos y parámetros hídricos de la especie

	CHR^0	Ψ_s^{100}	Ψ_s^0	ϵ
DA	-0,771(**)	-0,865(**)	-0,887(**)	-0,935(**)
DR	-0,818(**)	-0,824(**)	-0,831(**)	-0,913(**)
DMP	-0,703(**)	-0,874(**)	-0,876(**)	-0,917(**)
RH	0,812(**)	0,891(**)	0,904(**)	0,933(**)

** La correlación es significativa para $p \leq 0,01$

Leyenda: Densidad aparente (DA), densidad real (DR), diámetro medio de partículas (DMP), retención de humedad (RH), contenido hídrico relativo en el punto de pérdida de turgencia (CHR^0), potencial de soluto a máxima saturación (Ψ_s^{100}), potencial de soluto en el punto de pérdida de turgencia (Ψ_s^0); módulo de elasticidad de la pared celular(ϵ).

3.4.5 Análisis nutricional

Si bien el interés del conocimiento del estado nutritivo de las plantas para repoblación es su correlación con la respuesta postrasplante, el diagnóstico basado en la analítica de los tejidos permite determinar la concentración de cada nutriente (en deficiencia, óptimo, consumo de lujo y toxicidad) para utilizarlo como atributo final de calidad de planta así como para estudiar las necesidades nutritivas a lo largo del cultivo (Oliet *et al.*, 1999).

En la Figuras 22, 23 y 24 se representan los nomogramas vectoriales para el diagnóstico de nitrógeno, fósforo y potasio foliar en cada sustrato empleado durante el período de permanencia de las plantas en los tubetes.

Los resultados evidenciaron que durante el primer período, que comprendió entre los 45 días posterior a la siembra hasta los 56 días (Vector 1-2), en la mayoría de los sustratos, con excepción de BC, hubo un aumento de la concentración del nitrógeno foliar, lo que

indicó que durante ese período, el abastecimiento fue suficiente permitiéndole al vegetal un consumo de lujo (López y Alvarado, 2010), por lo tanto el aporte en el BC fue apenas suficiente para mantener el crecimiento del vegetal. Durante los 15 días posteriores, es decir, a partir de los 54 y hasta los 77 días (Vector 2-3) el crecimiento continuó, pero el nitrógeno se diluyó en la mayoría de los sustratos, por lo que el aporte no fue suficiente; solo C, C80 y en menor medida C20 y C50 proporcionaron cantidades suficientes para crecer.

En la etapa final de la evaluación (Vector 3-4) ninguno de los sustratos aportó las cantidades necesarias, evidenciándose un incremento en el crecimiento (Figura 16) con una consecuente disminución en la concentración del elemento en el tejido vegetal provocando dilución del mismo. López y Alvarado (2010), plantean que bajo estas condiciones el elemento puede limitar el crecimiento.

Margolis y Brand (1990) reportan que el nitrógeno es el macroelemento más abundante y mejor relacionado con el crecimiento en viveros, siendo parte constituyente de muchos compuestos vitales en el desarrollo, como las clorofilas, los aminoácidos, los ácidos nucleicos, las proteínas, entre otros. En particular, este elemento constituye parte fundamental de los enzimas que reducen el carbono en el proceso de fotosíntesis a compuestos vitales de la planta como son los carbohidratos, por ello su incorporación al tejido foliar implica mayor producción de biomasa.

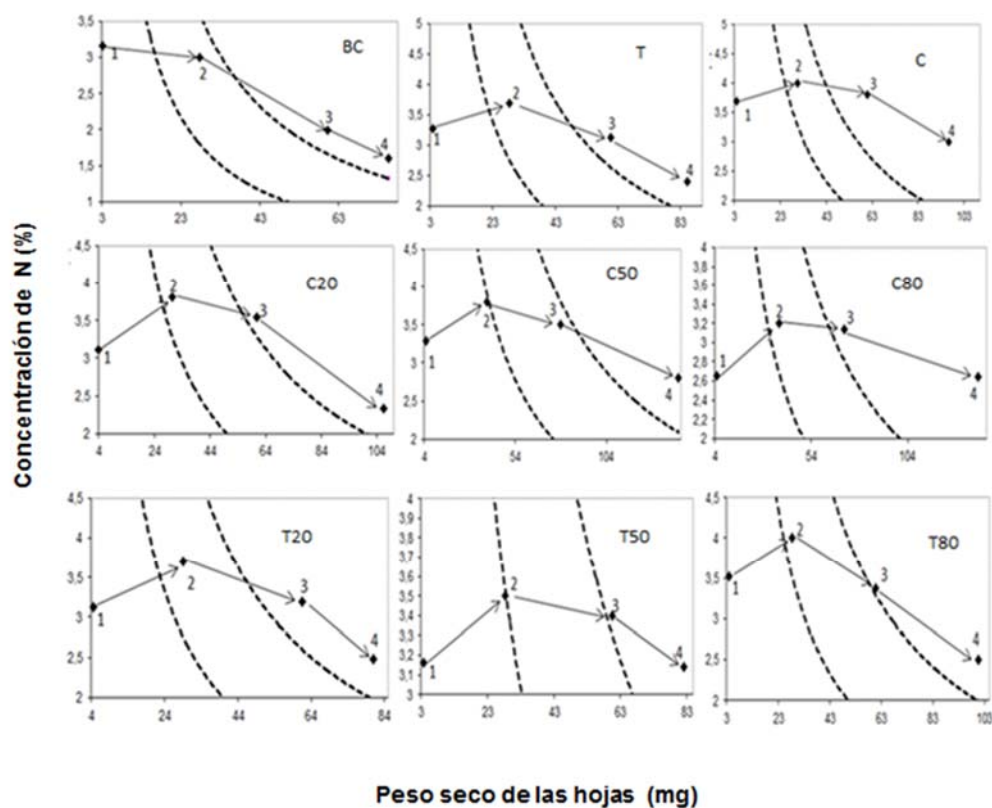


Figura 22. Nomograma vectorial para el análisis de nitrógeno foliar

El aporte de fósforo fue suficiente durante todo el período en aquellos sustratos que contenían C, no siendo así en el BC, T y las mezclas entre estos últimos, que en los últimos 15 días, es decir a partir de 54 días, ocurrió una dilución en el tejido foliar, por lo que no fueron aportadas las cantidades suficientes.

El fósforo interviene decisivamente con el nitrógeno en el crecimiento y desarrollo de la planta, ya que forma parte de moléculas esenciales como el ATP y el ADP o los fosfolípidos (constituyentes de las membranas celulares) y tienen un papel regulador en la síntesis de almidón y otros carbohidratos. En cuanto a la morfología de la planta, el fósforo estimula el desarrollo del sistema radical frente al aéreo, contribuyendo a producir plantas más equilibradas en contenedor. Numerosas experiencias confirman esta

relación (Oliet *et al.*, 1999). Asimismo, otros trabajos confirman una relación positiva entre la concentración de este elemento y la producción de nuevas raíces en condiciones controladas, lo que sin duda tiene una importancia fundamental en la supervivencia.

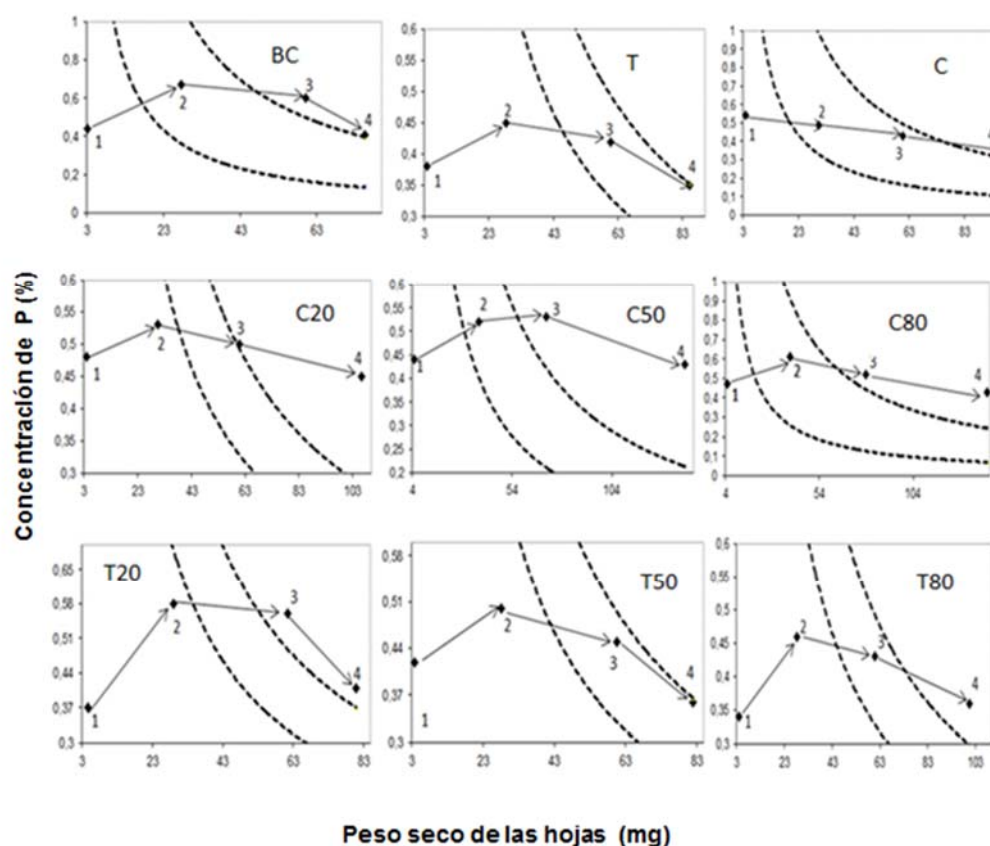


Figura 23. Nomograma vectorial para el análisis de fósforo foliar

Con relación al suministro de potasio se pudo comprobar que todos los sustratos abastecieron las cantidades suficientes e incluso en la mayoría con un consumo de lujo, por lo que este elemento no limita el incremento del peso seco.

El potasio, después del nitrógeno es el elemento esencial requerido en mayores cantidades por la planta. Aunque no forma parte de ninguna molécula orgánica, el papel más conocido en la fisiología de la planta es el ajuste osmótico y en la regulación de la apertura estomática, contribuyendo a la disminución de las pérdidas por transpiración. La

concentración de potasio en tejidos está relacionada asimismo con el vigor de la planta en vivero, mejorando la resistencia a enfermedades criptogámicas. Estas propiedades, junto con la mejora en la resistencia al frío, convierten al potasio en un elemento esencial en el proceso del arraigo (Landis, 1997).

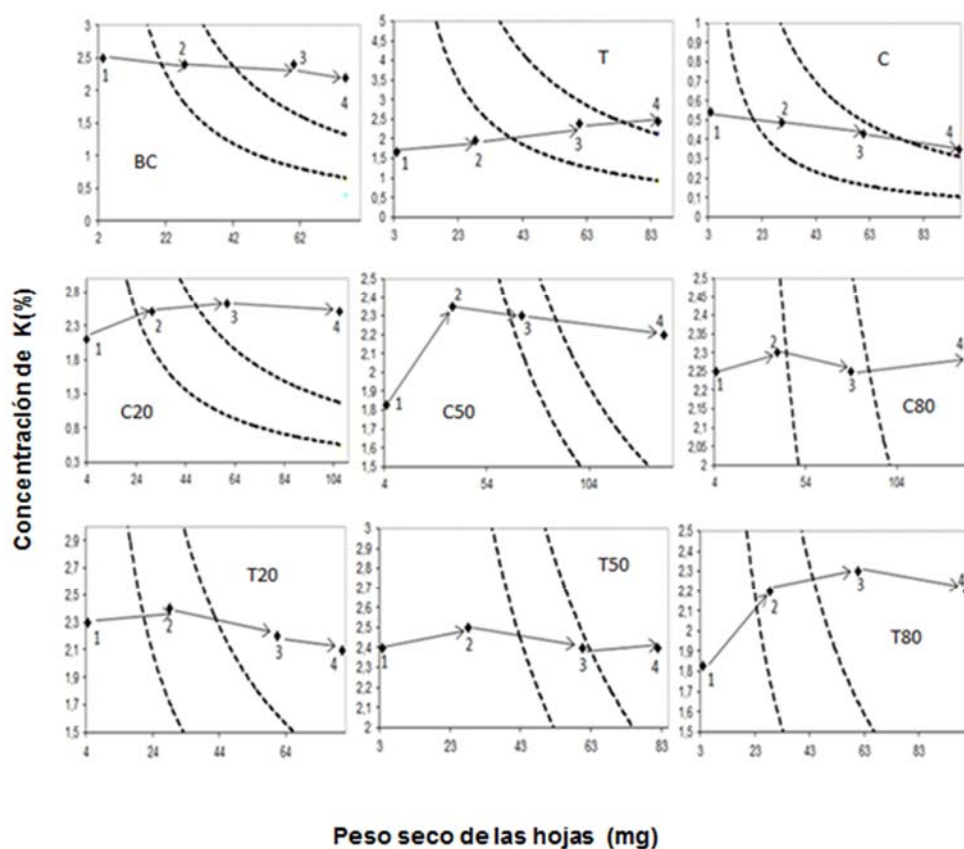


Figura 24. Nomograma vectorial para el análisis de potasio foliar

3.5 Análisis económico por concepto de sustitución de sustrato

La instalación de pirólisis que se propone utilizar en la obtención del biocarbón se basa en la tecnología de pirólisis lenta, en la cual se obtienen altos rendimientos de biocarbón. La instalación original fue diseñada, construida y operada por el grupo de pirólisis de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad de Oriente (Figura 25). El costo de

instalación del sistema de pirólisis resulta de \$ 5 209,00 MN, según lo reportado por Penedo *et al.*, (2006).

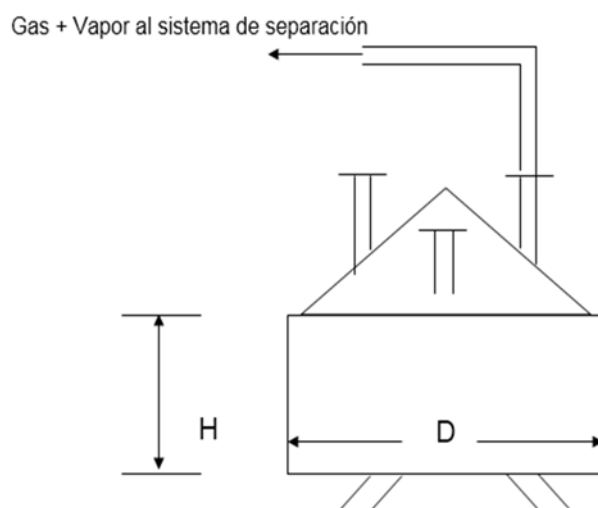


Figura 25. Esquema del diseño del horno de pirólisis

La capacidad del horno se obtiene según la expresión: $V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H$

$$V = \frac{\pi \cdot (0,684m)^2}{4} \cdot 0,68m$$

$$V = 0,2497 m^3$$

Cálculo de la masa de material a pirolizar

Conociendo la densidad aparente del material a pirolizar (aserrín), entonces la masa será:

$$M_{biomasa} = V_{biomasa} \cdot \rho_{biomasa}$$

al 70 % de capacidad del horno

$$M_{biomasa} = 0,1748m^3 \cdot 198kg / m^3 = 34,6104kg$$

Considerando un rendimiento de biocarbón del 50 % se obtendrá:

$$BC = 0,5 \cdot 34,6104 \text{ kg} = 17,3052 \text{ kg}$$

Lo que representa un volumen de biocarbón:

$$V_{\text{biocarbón}} = M / \rho = 0,1439 \text{ m}^3$$

Para la obtención de 1 ton (3,84 m³) se requieren de 26 cargas de biomasa (aserrín).

El costo de 1 ton de biocarbón (3,84 m³) sería \$46,08 MN, al considerar que el costo de 1m³ biocarbón es de \$12,00 MN (por obtenerse un 50 % de rendimiento del aserrín y el costo de 1m³ de aserrín en \$6,00 MN).

Costos de los sustratos

Turba: 1 ton = 1,61 m³ con un costo de \$ 41,10 se pueden llenar 17 888,88 tubetes.

Si se consideran 10 000 unidades sería \$ 22,97.

Biocarbón: 1 ton = 3,84 m³ con un costo de \$ 46,08 se pueden llenar 42 666,66 tubetes.

Si se consideran 10 000 unidades sería \$ 10,80.

Por lo tanto para mezclas volumétricas 1:1 (50 % biocarbón):

Se reduce a la mitad el costo de los sustratos individuales y se conforman las mezclas, para 10 000 unidades, quedando: \$ 16,88 (\$11,48 + \$ 5,40 = \$ 16,88); lo que significa un ahorro de \$ 6,09, que representa el 36,07 % del costo total.

Cachaza: 1 ton = 1,82 m³ con un costo de \$ 48,61 se pueden llenar 20 228,22 tubetes.

Si se consideran 10 000 unidades sería **\$ 24,03**.

Por lo tanto para mezclas volumétricas 1:1 (50 % biocarbón):

Se reduce a la mitad el costo de los sustratos individuales y se conforman las mezclas, para 10 000 unidades, quedando: **\$ 17,42** ($\$12,01 + \$ 5,40 = \$ 17,42$); lo que significa un ahorro de \$ 6,61, que representa el 37,94 % del costo total.

Estos resultados demuestran la eficiencia en el uso del biocarbón obteniendo mayor volumen de producción con un menor costo, con una sustitución del 50 % del sustrato.

CONCLUSIONES PARCIALES

- *Talipariti elatum* mostró una respuesta morfológica más favorable en las mezclas cachaza-biocarbón con 50 y 20 porciento de biocarbón (C50 y C80), atribuible a las características físicas y químicas de los sustratos.
- La especie desarrolla mecanismos de ajuste osmótico y elástico para el mantenimiento de la turgencia celular.
- Los nomogramas vectoriales reflejan el comportamiento nutricional, indicando que las mezclas cachaza-biocarbón con 50 y 20 porciento de biocarbón (C50 y C80) aportaron cantidades suficientes para el crecimiento de la especie en la mayor parte del período evaluado.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES GENERALES

- Las propiedades químicas y físicas del aserrín de *A. mangium* demuestran la posibilidad de transformación del material lignocelulósico en biocarbón a temperatura de 270 °C y velocidad de calentamiento de 5 °C min⁻¹.
- El biocarbón resultó ser un acondicionador de las propiedades físicas y químicas de los sustratos.
- *Talipariti elatum* mostró una respuesta morfológica más favorable en las mezclas cachaza-biocarbón con 50 y 20 porciento de biocarbón (C50 y C80), con el desarrollo de mecanismos de ajuste osmótico y elástico, atribuible a las características físicas y químicas de los sustratos.

RECOMENDACIONES

RECOMENDACIONES

- Presentar estos resultados a la Dirección Nacional Forestal con vista al empleo del biocarbón como acondicionador de las propiedades físicas y químicas de sustratos orgánicos.
- Se sugiere el empleo de los nomogramas vectoriales con fines investigativos para evaluar los aportes nutricionales de los sustratos para la producción de plántulas en contenedores y decidir el momento de fertilización o de trasplante.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

1. Abreu, N. R., Conesa, J.A., Pedretti, F. E. y Romero, R. O. 2012. Kinetic analysis: Simultaneous modelling of pyrolysis and combustion processes of *Dichrostachys cinerea*. Biomass and Bioenergy. 36:70-175.
2. Alarcón, A. 2004. Introducción a los cultivos sin suelo. In: curso de fertirriego: manejo en suelos y sustratos agrícolas. San José, Costa Rica. 23 p.
3. Ansorena, M.J. 1994. Sustratos, propiedades y caracterización. Ediciones Mundi-Prensa. España. 172 p.
4. Antal, M. y Varhegyi, G. 1995. Cellulose Pyrolysis Kinetics: The Current State of Knowledge. Industrial and Engineering Chemistry Research.34(3):703-717.
5. Arteaga, C.Y., Carballo, A.L.R., García, Q.Y., Alonso, L.M., Geada L.G. 2013. Caracterización del aserrín de *Acacia mangium* Willd para la obtención de biocarbón. Revista Latinoamericana de Recursos Naturales. 8 (2): 90-95.
6. Asai, H., Samson, B.K., Stephan, H.M., Songyikhangsuthor, K., Homma, K., Kiyono, Y., Inoue, Y., Shiraiwa T. y Horie, T., 2009. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield. Field Crops Research. 111:81–84.
7. ASTM (E778). 2006. Test Methods for Nitrogen in the Analysis Sample of Refuse-Derived Fuel.
8. ASTM (D1102–84). 2007. Standard Test Method for Ash in Wood.
9. ASTM (E1757–01). 2007. Standard Practice for Preparation of Biomass for Compositional Analysis.
10. ASTM (E-29). 1972. Guidelines for establishing sieve analysis procedures. 50 p.

11. ASTM (E777). 2006. Test Method for Carbon and Hydrogen in the Analysis Sample of Refuse-Derived Fuel.
12. ASTM (E871–82). 2006. Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels.
13. ASTM (E872–82). 2006. Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels.
14. Azcón, B. y Talón, J. 2001. Fundamentos de fisiología vegetal. Interamericana McGraw-Hill. Barcelona. España. 420 p.
15. Barnett, J.P. 1984. Relating seedling physiology to survival and growth in container-grown southern pines. En: Duryea, M. L., Brown, G. N. (Eds.): Seedling physiology and reforestation success. Nijhoff/Junk Pub. 157-178 p.
16. Bavestrello, R. C., Cavieres, L., Gallardo, Ibacache, J. A., Franck, N. y Zurita, S.A. 2013. Evaluación de la tolerancia a estrés por sequía en cuatro genotipos naturalizados de vid (*Vitis vinifera*) provenientes del norte de Chile. IDESIA (Chile). 30(3):83-92.
17. Beesley, L., Marmiroli, M. 2011. The immobilisation and retention of soluble arsenic, cadmium and zinc by biochar. Environmental Pollution. 159:474-480. doi:10.1016/j.envpol.2010.10.016
18. Bierman, C.J. 1993. Pulping and Papermaking. Academic Press. Inc. New York. USA. 472p.
19. Bilba, K y Ouensanga, A. 1996. Fourier transform infrared spectroscopic study of thermal degradation of sugar cane bagasse. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 38:61–73.

20. Bird, M.I. 1999. Stability of elemental carbon in savanna soil. *Global Biogeochemical Cycles*. 13 (4):923-932.
21. Boehm, H.P. 1994. Some aspects of surface chemistry of carbon blacks and other carbons. *Carbon*, Oxford. 32 (5):759-770.
22. Bradford, K.J. y Hsiao T.C. 1982. Physiological response to moderate water stress in: *Encyclopedia of plant Physiology*. New serie. 12:263-324.
23. Branca, C., Albano, A. y Di Blasi, C. 2005. Critical evaluation of global mechanisms of wood devolatilization. *Thermochimica Acta*. 429(2):133-141.
24. Brissette, J.C., Barnett, J.P. y Landis, T.D. 1991. Container seedlings. En: Duryea, M.L. y Dougherty, P.M. (Eds.) *Forest Regeneration Manual*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands. 117-141p.
25. Browne, F.L. 1958. Theories of combustion of wood and its control. U.S. Forest service, U.S. Department of agriculture, Forest Products Laboratory, Rep. 2136.
26. Browning, B.L. 1967. *Methods of wood chemistry*. Vol 1, 2. John Wiley and Sons, Nova Iorque. 384 p.
27. Burdett, A.N. 1990. Physiological processes in plantation establishment and the development of specifications for forest planting stock. *Journal of Forestry Research* 20:415-427.
28. Burés, S. 2002. *Sustratos*. Agrotécnicas S L. Barcelona, España. 342 p
29. Burés, S., Gago, M.C. y Martínez, F.X. 1997. Water characterization in granular materials (referred). *Acta Horticulturae*. 450:389-396.
30. Byrne, C.E. y Nagle D.C. 1996. Carbonization of wood for advanced materials applications. *Pergamon PII: S008-6223:00136-4*.

31. Caballero, J.A. y Conesa, J.A. 2005. Mathematical considerations for nonisothermal kinetics in thermal decomposition. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 73(1): 85-100.
32. Caballero, J.A., Front, R., Marcilla, A. y Conesa, J.A. 1997. Characterization of sewage sludges by primary and secondary pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 40(41):433-450.
33. Carballo, A.L.R., Orea, I.U. y Cordero, M.E. 2004 (a). Composición química de tres maderas en la provincia de Pinar del Río, Cuba a tres alturas del fuste comercial. Parte No.4. Estudio comparativo de la composición química. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 10 (002): 77-81.
34. Carballo, A.L.R., Orea, I.U. y Cordero, M.E. 2004 (b). Composición química de tres maderas en la provincia de Pinar del Río, Cuba a tres alturas del fuste comercial. Parte No. 1. *Corymbia citriodora*. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 10 (001): 57-62.
35. Carmona, E., Ordovás, J., Moreno, M.T., Avilés, M., Aguado, M.T. y Ortega, M.C. 2003. Granulometric characterization and alteration during composting of industrial cork residue for use as a growing media. *Hortscience*. 38:1242-1246.
36. Castellarin, S.D., Pfeiffer, A., Sivilotti, P., Degan, M., Peterlunger, E. y Di Gaspero, G. 2007. Transcriptional regulation of anthocyanin biosynthesis in ripening fruits of grapevine under seasonal water deficit. *Plant, Cell and Environment*. 30:1381-1399.
37. Castillo, M.I.C., Medina M.R., González, I. E., Cobas López M. y Bonilla V.M. 2006. Evaluación de diferentes sustratos compuestos por cachaza como elemento

- principal en la producción de plantas de *Eucalyptus grandis* en contenedores. Revista Forestal Baracoa vol. 25 (2):75-85.
38. Chavasse, C.G.R. 1980. Planting stock quality: a review of factors affecting performace. New Zealand Journal of Forestry 25:144-171.
39. Chidumayo, E.N. 1994. Effects of wood carbonization on soil and initial development of seedlings in miombo woodland, Zambia. Forest Ecology and Management. 70:353-357.
40. Chirino, E., Vilagrosa, A., Hernández, E.I., Matos, A. y Vallejo, V.R. 2008. Effects of a deep container on morpho-functional characteristics and root colonization in *Quercus suber* L. seedlings for reforestation in Mediterranean climate. Forest Ecology and Management. 256:779–785.
41. Cobas, L.M. 2001. Caracterización de los atributos de calidad de la planta de *Hibiscus elatus*. Sw. cultivada en tubetes. Pinar del Río. Tesis (en opción al grado científico de Doctora en Ciencias Forestales). Universidad de Pinar del Río 100 p.
42. Cobas, L.M., Castillo, I. y González, E. 2001. Comportamiento de diferentes parámetros morfológicos en la calidad de la planta de *Hibiscus elatus* Sw., cultivada en viveros sobre tubetes en la provincia de Pinar del Río. Revista Avances 3(1):17-21.
43. Contardi, L. 1999. Medición de plantines. Patagonia Forestal. 5(3):11-12.
44. Corcuera, L., Camarero, J.J. y Gil, P. E. 2002. Functional groups in *Quercus* species derived from the analysis of pressurevolume curves. Trees 16:465-472.
45. Damartzis, Th., Vamvuka, D., Sfakiotakis, S. y Zabaniotou, A. 2011. Thermal degradation studies and kinetic modeling of cardoon (*Cynara cardunculus*)

- pyrolysis using thermogravimetric analysis (TGA), Bioresource Technology, doi: 10.1016/j.biortech.2011.02.060
46. Deluc, L.G., Quilici, D.R., Decendit, A., Grimplet, J., Wheatley, M.D., Schlauch, K.A., Mérillon, J.M., Cushman, J.C. y Cramer, G.R. 2009. Water deficit alters differentially metabolic pathways affecting important flavor and quality traits in grape berries of Cabernet Sauvignon and Chardonnay. BMC genomics.10:212-224.
47. Demirbaş, A.1998. Kinetics for non-isothermal flash pyrolysis of hazelnut Shell. Bioresource Technol. 66:247-252.
48. Dey, D.C. y Parker, W.C. 1997. Morphological indicators of stock quality and field performance of red oak (*Quercus rubra* L.) seedlings under planted in a central Ontario shelter wood. New Forests. 14:145-156
49. Di Blasi, C. 2008. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis. Progress in Energy and Combustion Science. 34:47-90. doi:10.1016/j.pecs.2006.12.001
50. Donoso, S., Peña, K., Pacheco, C., Luna, G. y Aguirre, A. 2011. Respuesta fisiológica y de crecimiento en plantas de *Quillaja saponaria* y *Cryptocarya alba* sometidas a restricción hídrica. Bosque. 32(2):187-195.
51. Durenkamp, M., Luo, Y. y Brookes, P.C. 2010. Impact of black carbon addition to soil on the determination of soil microbial biomass by fumigation extraction. Soil Biol. Biochem. 42:2026–2029.
52. El Hage, R., Brosse, N., Chrusciel, L., Sanchez Ch., Sannigrahi, P., Ragauskas, A. Characterization of milled wood lignin and ethanol organosolv lignin from

- miscanthus. Polymer Degradation and Stability. 94:1632–1638.
doi:10.1016/j.polymdegradstab.2009.07.007
53. Erçin, D. y Yürüm, Y. 2003. Carbonisation of Fir (*Abies bornmulleriana*) wood in an open pyrolysis system at 50–300 °C. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 67:11–22.
54. Evans, R.J. y Milne, T.A. 1988 (a). Mass spectrometric studies of the relationship of pyrolysis oil composition to formation mechanisms and feedstock composition. Res. Thermochem. Biomass Convers. 6:264-279.
55. Evans, R.J. y Milne, T.A. 1988 (b). Liquids fuels from the pyrolysis of municipal solid waste and its components: Rapid product characterization and process parameter screening by molecular beam, mass spectrometry. Energy biomass wastes. 11:807-838.
56. Faix, O., Bremer, J., Schimidt, O. y Stevanovic, T., 1991. Monitoring of chemical changes in white-rot degraded beech wood by pyrolysis-gas chromatography and Fourier transform infrared spectroscopy. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 21:147–162.
57. Falcão, N.P.S., Comerford, N.B. y Lehmann, J. 2003. Determining nutrient bioavailability of Amazonian dark earth soils: methodological challenges. In: Lehmann, J. *et al.*, (Eds.). Amazonian dark earths: origin, properties, and management. New York: Kluwer Academic, 255-270 p.
58. Fengel D, Wegener D. 1984. Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions. ISBN 311-008481-3. New York: Walter de Gruyter; Berlin. 613 p.
59. Fuentes, M. y Oropeza, J. 1996. Evaluación preliminar del comportamiento de algunos materiales orgánicos como sustratos para la siembra de *Eucalyptus*

- urophylla*. Segundo Taller Internacional Biomasa Vegetal. Bioforest, Pinar del Río. Cuba. 23 p.
60. Galignani, M y Brunetto, M. R. 2004. Infrared detection in flow analysis—developments and trends (review). *Talanta* 64:1127–1146.
61. García, A.N.; Font, R. y Marcilla, A. 1992. Kinetic studies of the primary pyrolysis of municipal solid waste in a pyroprobe 1000. *Analytical and Applied Pyrolysis*. 23:99-119.
62. Glaser, B., Haumaier, L., Guggenberger, G. y Zech, W. 2001. The Terra Preta phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften*. 88:37–41.
63. Glaser, B., Lehmann, J. y Zech, W. 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal a review. *Biol. Fertil. Soils*. 35:219–230.
64. Gomes, J.M., Couto L., Leite, H.G., Xavier, A. y García, S.L.R. 2002. Parâmetros morfológicos na avaliação da qualidade de Mudas de *Eucalyptus grandis*. *Rev. Arvore*. 26(6):655-664.
65. Graber, E.R., Harel, Y.M., Kolton, M., Cytryn, E., Silber, A., David, D.R., Tsechansky, L., Borenshtein, M. y Elad, Y., 2010. Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertigated soilless media. *Plant Soil*. 337:481–496.
66. Gronli, M.G., Várhegyi, G. y Di Blasi, C. 2002. Thermogravimetric Analysis and Devolatilization Kinetics of Wood. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 41:4201-4208.

67. Guerrini, A. y Trigueiro, R.M. 2004. Atributos físicos e químicos de substratos compostos por biosólidos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 28(6):1069-1076.
68. Gullichsen, J. y Paulapuro, H. 2000. *Forest Resources and Sustainable Management*. Fapet Oy: Helsinki, Finland.
69. Guzmán, J.M. 2003. Substratos y tecnología de almácigo. p 25. En: Memoria de cursos de producción en ambientes protegidos. UCR-CYTED. San José, Costa Rica.
70. Handreck, K.A. 1983. Particle size and the physical properties of growing media for containers. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 14:209-222.
71. Harrington, K.J., Higgins, H.G. y Michell, A.J. 1964. Infrared spectra of *Eucalyptus regnans* F. Muell. and *Pinus radiata* D.Don. *Holzforschung*. 18:108–113.
72. Hergert, H.L. 1971. Infrared spectra. In: Sarkanen, K.V., Ludwig, C.H. (Eds.), *Lignins: Occurrence, Formation, Structure and Reactions*. Wiley-Interscience, New York, pp. 267–297.
73. Herralde, F. 2000. Estudio integral de las respuestas ecofisiológicas al estrés hídrico: caracterización de variedades de almendro. Tesis Doctoral. Barcelona. Universidad de Barcelona. Facultad de Biología. 140 p.
74. Hunt, G.A. 1990. Effect of styroblock design and copper on morphology of conifer seedlings. En: Rose, R., S. J. Campbell y T. D. Landis (eds.). *Proceedings, Western Forest Nursery Association*.
75. Jauhiainen, J., Conesa, J.A., Font, R. y Gullón, M. 2004. Kinetics of the pyrolysis and combustion of olive oil solid waste. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 72:9-15.

76. Jeguirim, M. y Trouvé, G. 2009. Pyrolysis characteristics and kinetics of *Arundo donax* using thermogravimetric analysis. *Bioresource Technology*.100(17):4026-4031.
77. Jin, S.K, Hwa, S.J y Sik J.K. 2010. Fast pyrolysis of palm kernel shells: Influence of operation parameters on the bio-oil yield and the yield of phenol and phenolic compounds. *Bioresource Technology*. 101:9294-9300.
78. Kilser, F.I. y Broido, A. 1965. Speculation on the nature of cellulosic pyrolysis. *Piromyamics*. 2:151-163.
79. Klein, M.T. y Virk, P.S. 1983. Mothe pathway in lignin thermolysis. Phenetyl phenyl ether. *Ind. Eng. Chem. Fundam*. 22:35-45.
80. Koch, J. y Kaminsky, W. 1993. Pyrolysis of a refinery sewage sludge. *Erdöl, Kohle, Erdgas, Petrochemie*. 46:323.
81. Kozlowski, T.T., Kramer, P. J. y Pallady, S.G. 1991. The physiological ecology of woody plants. *Academic Press, Inc*. 345p.
82. Kramer, P. J. 1974. Relaciones hídricas de Suelos y Plantas. *Edutex, S. A. México*. 376 p.
83. Kramer, P.J. y Boyer, J.S. 1995. Water relations of plants and soils. *San Diego: Academic Press*, 495 p.
84. Kubiske, M.E y Abrams, M.D. 1991. Seasonal, diurnal and rehydration-induced variation of curves pressure-volume relation in *Pseudotsugamenziesii*. *Physiol. Plantarum* 83:107-116.
85. Kyun, S.D., Shin, S.P, Hwang, J., Tae-U, Y. 2010. Study of the pyrolysis of biomass using thermo-gravimetric analysis (TGA) and concentration

- measurements of the evolved species. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 89:66–73. doi:10.1016/j.jaap.2010.05.008
86. Laird, D., Fleming, P., Wang, B., Horton, R. y Karlen, D. 2010. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma* 158:436–442. doi:10.1016/j.geoderma.2010.05.012
87. Landis, T. 1997. Monitoring seedling nutrition in bare root and container nurseries. En: Haase, D.L., Rose, R. (Eds). *Forest seedling nutrition from the nursery to the field*. Symposium Proceedings. NTC. Oregon State University. 69-83 p.
88. Landis, T., Tinus, S., Barnett, J., Nesley, R., Rodríguez, T., Sánchez, V. y Aldana, B. 2000. Manual de vivero para la producción de especies forestales en contenedores. Vol. 2. Contenedores y medios de crecimiento. Handbook. 126 p.
89. Landis, T.D. 1985. Mineral nutrition as an index of seedling quality. En: Duryea, M. (Ed.): *Evaluating seedling quality: principles, procedures and predictive abilities of major tests*. Forest Research Lab. Oregon State University. 29-48 p.
90. Larcher, W. 1995. *Physiological plant ecology*. Springer. 3a. ed. Berlin, Alemania. 506 p.
91. Lawlor, D.W. y Cornic, G. 2002. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. *Plant, Cell and Environment*. 25:275-294. doi: 10.1046/j.0016-8025.2001.00814.x.
92. Leal, L. E., Juárez, V. y Terán, M. 2011. Composición química de la madera de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden procedente de Finca Las Maravillas, Departamento de Orán, Salta. *Quebracho (Santiago del Estero)*. 19(2):19-30.

-
93. Lehmann, J. 2005. Near-edge x-ray absorption fine structure (NEXAFS) spectroscopy for mapping nano-scale distribution of organic carbon forms in soil: Application to black carbon particles. *Global Biogeochemistry Cycles*. 19:1013-1025.
94. Lehmann, J. 2007. Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment*, Washington. 5(7):381-387.
95. Lenz, T. Wright, I. y Westoby, M. 2006. Interrelations among pressure–volume curve traits across species and water availability gradients. *Physiologia Plantarum*. 127:423–433.
96. León, L. E. 2010. Efecto del sustrato y el manejo del riego en la fase de vivero de *Talipariti elatum* (Sw.) Fryxell en contenedores. Pinar del Río. Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Ecológicas. 100 p.
97. Levitt, J. 1980. Responses of plants to environmental stresses. Vol. II. Water, radiation, salts and other stresses. 2nd Ed. Acad. Press. New York, USA. 606 p.
98. Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Kinyangi, J., Grossman, J. y O'Neill B. 2006. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Sci Soc Am J*. 70:1719-1730.
99. Lin, Y.R. y Teng, H. 2002, Micro and Mesopore. *Mater*. 54:167-173.
100. Liu, Sh. 2010. Woody biomass: Niche position as a source of sustainable renewable chemicals and energy and kinetics of hot-water extraction/hydrolysis. *Biotechnology Advances* 28: 563–582. doi:10.1016/j.biotechadv.2010.05.006
101. López, L.M.A y Alvarado, L.J. 2010. Interpretación de nomogramas de análisis de vectores para diagnóstico nutrimental de especies forestales. *Madera y Bosques* 16(1):99-108.

102. López, L.M.A. y Estañol, B.E. 2007. Detección de deficiencias de hierro en *Pinus leiophylla* a partir de los efectos de dilución y concentración nutrimental. *Terra Latinoamericana* 25(1):9-15.
103. López, L.M.A., Reich, R.M., Aguirre, B.C. y Velázquez, M.A. 2009. Pine growth and nutrient status as related to pine/alder ratio in mixed stands. *J. Biol. Sci.* 9(7):637-647.
104. MacRae, W.D. y Towers, G.H.N. 1984. Biological activities of lignans. *Phytochemistry*. 23(6):1207–1220.
105. Madari, B.E. 2009. Matéria orgânica dos solos antrópicos da Amazônia (Terra Preta de Índio): suas características e papel na sustentabilidade da fertilidade do solo. In: Teixeira, W.G. *et al.* As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas. Manaus: EMBRAPA Amazônia Ocidental, 174-187 p.
106. Mahanta, P. 2009. Determination and comparison of kinetic parameters of low density biomass fuels. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 1(2):023109-023112.
107. Margolis, M.A. y Brand, D.G. 1990. An ecophysiological basis for understanding plantation establishment. *Can. J. For. Res.* 20:375-390.
108. Mark, P. 2009. Agricultural bio-char production, renewable energy generation and farm carbon sequestration in Western Australia: Certainty, uncertainty and risk. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 129:1–7. doi:10.1016/j.agee.2008.08.006
109. Martínez, L.Y, Fernández, C.R.R., Álvarez, L.D, Barrero, M.H. y García, G.M. 2012 a. Estimación del volumen potencial de aserrín en plantaciones de *Pinus*

- caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari en la EFI Macurije. Revista Avance. 14:2.
110. Martínez, L.Y, Fernández, C.R.R., Álvarez, L.D, García, G.M. y Rodríguez, A.R. 2012 b. Perspectivas para la utilización del aserrín en la producción de tableros madera plástico con propiedades ignífugos. Revista Avance. 14:2.
111. Mateo, S.J.J., Bonifacio, V. R., Pérez, R.S. R., Mohedano, C.L. y Capulín, G.J. 2011. Producción de (*Cedrela odorata* L.), en sustratos a base de aserrín crudo en sistema tecnificado en Tecpan de Galeana, Guerrero, Mexico. Ra Ximhai. 7(1):123-132.
112. Mengel, K. y Kirkby, A.E. 2000. Principios de nutrición vegetal. Traducción al español de la 4^{ta}. ed. por R. J. Melgar y M. Ruiz. Instituto Internacional de la Potasa. Berna, Suiza.
113. Meszaros, E., Varhegyi, G., Jakab, E. y Marosvolgyi, B. 2004. Thermogravimetric and Reaction Kinetic Analysis of Biomass Samples from an Energy Plantation. Energy and Fuels. 18(2):497-507.
114. Mexal, J.G. y Landis, T.D. 1990. Target seedling concepts: height and diameter. In Target seedling symposium: proceedings, combined meeting of the Western Forest Nursery Associations. Roseburg, Oregon. USDA, Forest Service. 286 p.
115. MINAGRI. 1984. Manual de interpretación de los índices físico-químicos y morfológicos de los suelos cubanos. 73 p.
116. Moltó, J., Font, R., Gálvez, A. y Conesa, J.A. 2009. Pyrolysis and combustion of electronic wastes. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 84 (1):68-78.
117. Navarro, C.R. y Calvo. M.J. 2002. Efecto de la fertilización de crecimiento con nitrógeno sobre la arquitectura y el contenido de almidón en la raíz de brinzales

- de *Pinus halepensis* Mill.; *Pinus pinaster* Aiton.; *Pinus pinea* L. *Scientia gerundensis*. 26:5-21.
118. Navarro, M.R, Salvador, S.P. y Del Campo , A. 2006. Morfología y establecimiento de los plantones. In book: Calidad de planta forestal para la restauración en ambientes mediterráneos. Estado actual de conocimientos., Chapter: Morfología y establecimiento de plantones, Publisher: DGB. Ministerio de Medio Ambiente. ISBN: 10:84-8014-670-2. pp. 67-88.
- 119.NC-XX 2009. Norma Cubana. Humus de lombriz. Determinación de pH, conductividad eléctrica, cloruro y sodio soluble.
- 120.Noguera, P., Abad, M., Puchades, R., Maquieira, A. y Noguera, V. 2003. Influence of particle size on physical and chemical properties of coconut coir dust as container medium. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 34:593-605.
- 121.Novak, J.M., Busscher,W.J.,Watts, D.W., Laird, D.A., Ahmedna, M.A. y Niandou, M.A.S. 2010. Short-term CO₂ mineralization after additions of biochar and switchgrass to a Typic Kandiudult. *Geoderma*. 154:281-288. doi:10.1016/j.geoderma.2009.10.014
- 122.NRAG 144-2010 (norma ramal). 2010. Tejido vegetal. Determinación de nitrógeno, fósforo y potasio.
- 123.Oguntunde, P., Fosu, M., Ajayi, A., y van de Giesen, N. 2004. Effects of charcoal production on maize yield, chemical properties and texture of soil. *Biol Fertil Soils*. 39:295-299.

124. Oguntunde, P.G., Abiodun, B.J., Ajayi, A.E., van de Giesen, N., 2008. Effects of charcoal production on soil physical properties in Ghana. *Journal of Plant Nutrient and Soil Science*. 171:591–596.
125. Ohnishi, A., Takaqi, E. y Kato, K. 1976. Curie-Point pyrolysis, gas liquid chromatography of xylan. *Carbohydr. Res.* 50:275-278.
126. Oliet, J. A. 2000. La calidad de la planta forestal en vivero. Ed. ETSIAM. Córdoba. España. 93 p.
127. Oliet, J., Segura, M. L., Martín, F, Blanco, E., Serrada, R., López, A.M. y Artero, F. 1999. Los fertilizantes de liberación controlada lenta aplicados a la producción de las plantas forestal en el vivero forestal. Efecto de dosis y formulaciones sobre la calidad de *Pinus halepensis* Mill. *Investigaciones Agrarias. Sistemas y Recursos Forestales*. 8(1):207-228.
128. Ona, T. 1997. Non-destructive determination of wood constituents by Fourier transform raman Spectroscopy. *Journal of wood chemistry and technology*. 17(4):399-417.
129. Ona, T. 1998. Non- destructive determination in native wood by Fourier transform Raman Spectroscopy. *Journal of Wood Chemistry and Technology*. 18(1):43-51.
130. Orea I., U., Carballo, A. L. R. y Cordero, M. E. 2004 (b). Composición química de tres maderas en la provincia de Pinar del Río, Cuba a tres alturas del fuste comercial. Parte No. 3. *Eucalyptus saligna* Smith. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 10 (002):71-75.
131. Orea, I. U., Carballo, A. L. R. y Cordero, M. E. 2004 (a). Composición química de tres maderas en la provincia de Pinar del Río, Cuba a tres alturas del fuste

-
- comercial. Parte No. 2. *Eucalyptus pellita* F. Muell. Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente.10 (001): 51-55.
132. Orfão, J.J.M., Antunes, F.J.A. y Figueiredo, J.L. 1999. Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials three independent reactions model. *Fuell*. 78(3):349-358.
133. Pandey, K.K. y Pitman, A.J. 2003. FTIR studies of the changes in wood chemistry following decay by brown-rot and white-rot fungi. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 52:151–160. doi:10.1016/S0964-8305(03)00052-0
134. Pandey, K.K. y Theagarajan, K.S. 1997. Analysis of wood surfaces by diffuse reflectance (DRIFT) and photoacoustic (PAS) Fourier transform infrared spectroscopic techniques. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 55:383–390.
135. Parviainen, J.V. 1981. Qualidade e avaliacao da qualidade de mudas florestais In: Seminario de sementes e viveiros florestais. Curitiba: FUPEF, 59-90 p.
136. Peña, R.K, Aranda, X. y Fleck, I. 2004. Stomatal limitation to CO₂ assimilation and down-regulation of photosynthesis in *Quercus ilex* resprouts in response to slowly imposed drought. *Tree Physiology* 24:813–822.
137. Penedo M.M., Falcón, F.J., Bertrán, G.Y, Giralt, O.G. 2006. Diseño, construcción y operación de una planta escala piloto para la pirólisis de biomasa vegetal *Revista Cubana de Química*.18 (1):133-134.
138. Pennell, K.D. Specific surface area. 2002. In: Topp, G.C., Dane, J.H. (Eds.). *Methods of soil analysis*. Madison: SSSA. 295–315 p. (Soil book series, 5).
139. Peñuelas, J. y Ocaña, L. 1991. La calidad de la planta forestal. Jornada sobre la situación actual y técnicas modernas para la producción de posturas. Madrid. 50 p.

140. Pereira, H., Graça, J. y Rodrigues, J.C. 2003. Wood chemistry in relation to quality. In: Wood quality and its biological basis. John R. Barnett e George Jeronimidis (Ed.). 53-86 p.
141. Prasad, M. y Ní Chualáin, D. 2004. Relationship between particle size and air space of growing media. *Acta Horticulturae*. 648:161-166.
142. Purevsuren, B., Avid, B., Tesche, B. y Davaajav, Y.A. 2003. A biochar from casein and its properties. *Journal of Materials Science*. 38:2347–2351.
143. Puttonen, P. 1997. Looking for the “silver bullet”- can one test do it all? *New Forests*. 13:9-27.
144. Quinde, A. y Paszner, L., 1992. Behavior of the major resin- and fatty acids of slash pine (*Pinus elliottii* engelm) during organosolv pulping. *Holzforschung*. 46 (6):513–522.
145. Raviv, M., Wallach, R. y Blom, T.J. 2004. The effect of physical properties of soilless media on plant performance, a review. *Acta Horticulturae*. 644:251- 259.
146. Raymond, C.A. 2002. Genetics of *Eucalyptus* wood properties. *Annals of Forest Science*. 59:525–531.
147. Ritchie, G. 1984. Root growth potencial: principles, procedures and predictive ability. En: Duryea, M. L (Ed.): Evaluating seedling quality. Principles, procedures and predictive abilities of major test. Forest Research Lab. Oregon State University. Corvallis.
148. Robichaux, R.H. 1984. Variation in the tissue water relations of two sympatric Hawaiian *Dubautia* species and their natural hybrid. *Oecologia*. 65:75-81.

149. Rodrigues, J., Meier, D. y Pereira, H. 1999. Determination of tree variation in syringyl:guaiacyl ratio of *Eucalyptus globulus* wood lignin by analytical pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 48:121–128.
150. Rodrigues, J.C. 1998. Caracterização da Composição Química da Madeira de *Eucalyptus globulus* Labill. por espectroscopia de infravermelho e pirólise analítica. Dissertação de Doutoramento. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia. 123 p
151. Rodríguez, J.J., García, F. y Cordero, T. 1989. La pirólisis como vía de aprovechamiento de los residuos lignocelulósicos. *Ing. Quimi.* 21(2):141-147.
152. Romero, A.E., Ryder, J., Fisher, J.T. y Mexal, J.G. 1986. Root system modification of container stock for arid land plantation. *Forest Ecology and Management* 16:281-290.
153. Rook, D.A. 1991. Seedling development and physiology in relation to mineral nutrition. En: van den Driessche, R. (Ed.): Mineral nutrition in conifer seedlings. CRC Press. 86-112p.
154. Ruiz, J. 1999. Potencial hídrico y curva presión volumen en Chachafruto (*Erythrina edulis*). Universidad Nacional de Colombia, Palmira. 60 p.
155. Rutkowski, P. 2011. Pyrolysis of cellulose, xylan and lignin with the K₂CO₃ and ZnCl₂ addition for bio-oil production. *Fuel Processing Technology* 92:517–522. doi:10.1016/j.fuproc.2010.11.006
156. Salleo, S. y Lo Gullo, M. 1990. Sclerophylly and plant water relations in three mediterranean *Quercus* species. *Annals of Botany*. 65:259-270.
157. Santiago, T.O. 2002. Evaluación del crecimiento en vivero de plántulas de cinco especies de coníferas producidas en tres mezclas de sustratos y tres tamaños de

- contenedor. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 241 p.
158. Schmidt, M.W.I., Skjemstad, J.O., Gehrt, E. y Kögel, K.I. 1999. Charred organic carbon in German chernozemic soils. *European Journal of Soil Science*. 50:351–365.
159. Scholander, P.F.; Hemmingsen, E. y Garey, W. 1965. Sap pressure in vascular plants. *Science*. 148:339-346.
160. Schultz, T.P. y Glasser, W.G. 1986. Quantitative structural analysis of lignin by diffuse reflectance Fourier transform spectrometry. *Holzforschung*. 40:37–44.
161. SEF (Servicio Estatal Forestal). 2012. Dinámica Forestal. Ministerio de la Agricultura. Pinar del Río, Cuba.
162. Serrada, R. 1995. Apuntes de Repoblados Forestales. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal. Editorial Conde de Valle Salazar. España. 379 p.
163. Shackel, K. 1997. Plant water status as an index of irrigation need in deciduous fruit trees. *HortTechnology* 7(1):23-29.
164. Shafizadeh, F. 1982. Introduction to pyrolysis of biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 3(4):283-305.
165. Sjöström, E. 1981. Wood Chemistry. Fundamentals and Applications. Academic Press. New York. 223 p.
166. Skoog, D.A, West, D.M. y Holler, F.J. 1992. Fundamentals of Analytical Chemistry. Ed Saunders College Publishing. Sixth edition.
167. Smith, L.J., Collins, P.H. y Bailey, L.V. 2010. The effect of young biochar on soil respiration. *Soil Biology and Biochemistry*. 42:2345-2347.

168. Sohi, S.P., Krull, E., Lopez, C.E. y Bol, R. 2010. A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy*. 105:47–82.
169. South, D.B. 2000. Planting morphologically improved pine seedlings to increase survival and growth. *Forestry and Wildlife Research Series N° 1*. Alabama Agricultural Experiment Station. Auburn University, Alabama. 12 p.
170. Steiner, C., Teixeira, W., Lehmann, J., Nehls, T., Macedo, J., Blum, W. y Zech, W., 2007. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant and Soil*. 291:275-290.
171. Suárez, J., Luengo, C., Fonseca, F., Bezzo, G., y Beatón, P. 2000. Thermochemical properties of Cuban biomass. *Energy Sources*. 22:851–857.
172. Sumner, M.E. 1977 (a). Preliminary NPK foliar diagnostic norms for wheat. *Commun. Soil Sci. Plant Anal*. 8(2):148-167.
173. Sumner, M.E. 1977b. Use of the DRIS system in foliar diagnosis of crops at high yield levels. *Commun. Soil Sci. Plant Anal*. 8(3):251-267.
174. Szabados, L. y Savouré, A. 2010. Proline: a multifunctional amino acid. *Trends in Plant Science*. 15:89-97. doi: 10.1016/j.tplants.2009.11.009.
175. Taiz, L. y Zeiger, E. 2006. *Fisiología vegetal*, Volumen II, Universidad de California en Los Ángeles. U.S.A. 1130 p.
176. TAPPI (T203 om-93). 1993. Alpha, beta and gamma cellulose in pulp.
177. TAPPI (T204 cm-97). 1997. Solvent extractives of wood and pulp.
178. TAPPI (T222 cm-84). 1984. Pentosans in wood and pulp.
179. TAPPI (T222 om-98). 1998. Acid-insoluble lignin in wood and pulp.

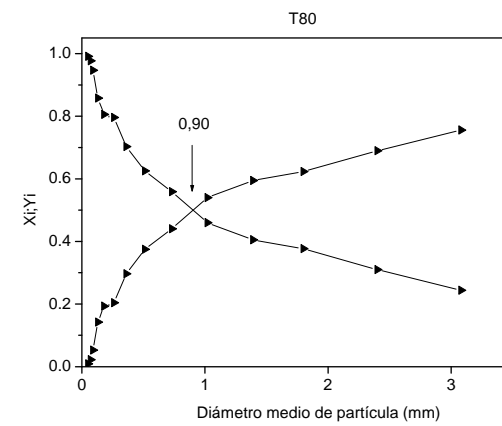
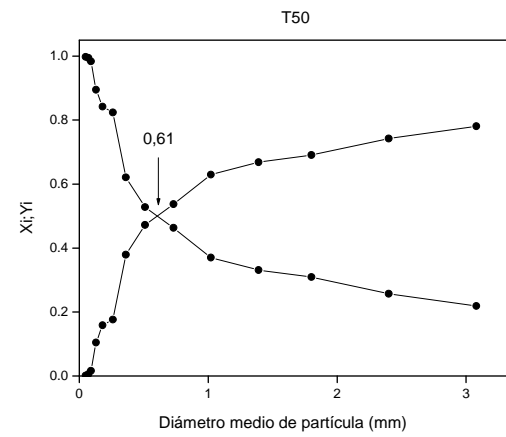
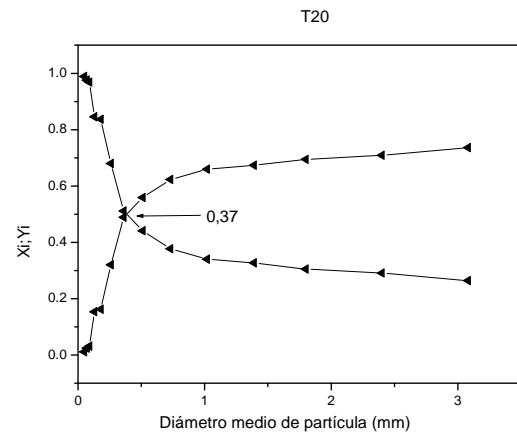
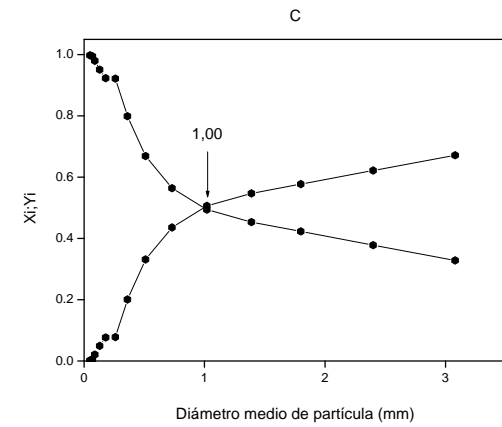
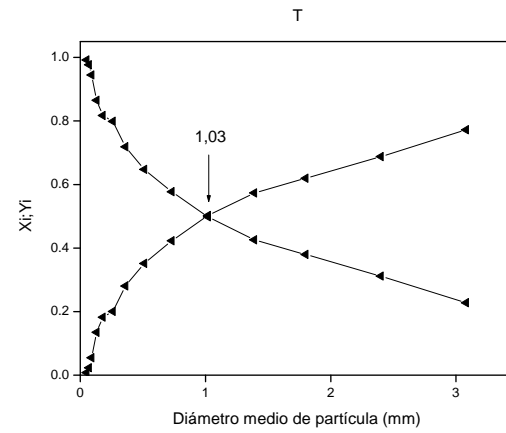
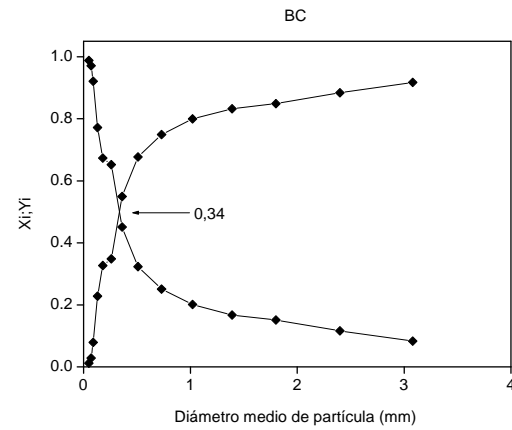
180. TAPPI. 1994. Tappi Test methods. Tappi Press. Atlanta. Georgia.
181. Theander, O. 1991. Chemical analysis of lignocellulose materials. *Animal Feed Science and Technology*. 32:35-44.
182. Thompson, B.E. 1985. Seedling morphological evaluation. What can you tell by looking. In: *Evaluating seedling quality: principles, procedures and predictive abilities of major test*. M.L. Duryea eds. Forest Research Laboratory. Oregon State University. 59-69 p.
183. Timmer, V.R. 1991a. Effects of contrasting fertilization and moisture regimens of biomass nutrients and Water relations of container grown red seedlings *New Forest*. 5(4):335-348.
184. Timmer, V.R. 1991b. Interpretation of seedling analysis and visual symptoms. 113- 134p. In, R. van den Driessche (ed.). *Mineral nutrition of conifer seedlings*. CRC Press. Boca Raton, FL, EE.UU.
185. Timmer, V.R. y Stone, E.L. 1978. Comparative foliar analysis of young balsam fir fertilized with nitrogen, phosphorus, potassium, and lime. *Soil Sc. Soc. Am. Proc*. 42:125-130.
186. Turner, N. 1986. Measurement of plant water status by the pressure chamber technique. *Irrigation Science* 9:289-308.
187. Tyree, M. y Hammel, H. 1972. The measurement of the turgor pressure and the water relations of plants by the pressure bomb-technique. *Journal of Experimental Botany*. 23:267-282.
188. Vence, L.B. 2008. Disponibilidad de agua-aire en sustratos para plantas. *Ciencias del Suelo*. 26:105-114

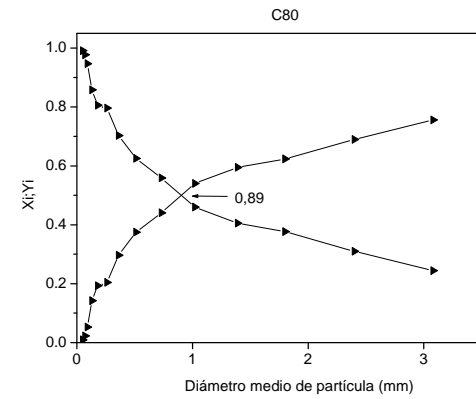
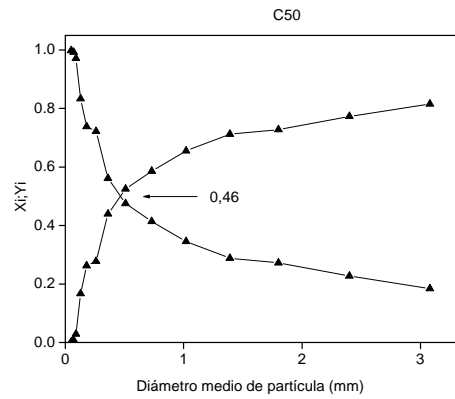
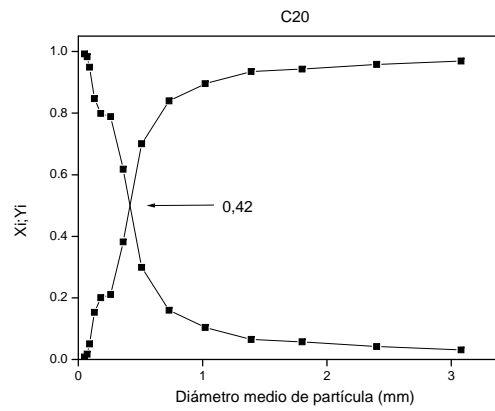
-
189. Verhoeven, J.D. 1984. Scanning electron microscopy. In: ASM-HANDBOOK. [S.1.]: The Information Society, 84-109 p.
190. Villar, S.P. 2003. Importancia de la calidad de la planta en los proyectos de revegetación. En: Restauración de Ecosistemas en Ambientes Mediterráneos. Rey-Benayas, J. M., Espigares Pinilla, T. y Nicolau Ibarra, J. M. (Eds.), Universidad de Alcalá/Asociación Española de Ecología Terrestre, 65-86p.
191. Wallis, A.F.A. y Wearne, R.H., 1997. Characterization of resin in *radiata pine* woods, bisulfite pulps and mill pith samples. *Appita*. 50 (5):409–414.
192. Warncke, D.D. y Krauskopf, D.M. 1983. Greenhouse growth media: testing and nutrition guidelines. Cooperative Extension Service. Extension Bulletin E-1736. Michigan State University. 6 p.
193. Warwick, N.W.M. y Thukten, T. 2006. Water relations of phyllodinous and non-phyllodinous Acacias, with particular reference to osmotic adjustment. *Physiologia Plantarum* 127:393-403.
194. Wenzl, H.F.J. 1970. Further destructive of wood. The Chemical Technology of Wood, Academic Press, New York.
195. Wimmer, R., Downes, G.M., Evans, R., Rasmussen, G. y French, J. 2002. Direct effect softwood characteristics on pulp and handsheet properties of *Eucalyptus globulus*. *Holzforschung*. 56:244–252.
196. Yamato, M., Okimori, Y., Wibowo, I.F.; Ashori, S. y Ogawa, M. 2006. Effects of the application of charred bark of *Acacia mangium* on the yield of maize, cowpea and peanut, and soil chemical properties in South Sumatra, Indonesia. *Soil Science and Plant Nutrition*. 52:489–495.

197. Zumkeller, S.D., Galbiattib J.A., de Paula R.C., y Gonzales J.L. 2009. Producción de plantas de *Tabebuia heptaphylla* en diferentes sustratos y niveles de irrigación, en condiciones de invernadero. Bosque 30(1):27-35.
198. Zwieten, L.V., Kimber, S., Morris, S., Chan, K.Y., Downie, A., Rust, J., Joseph, S. y Cowie, A., 2010. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. Plant and Soil. 327:235–246.

ANEXOS

Anexo 1. Diámetro medio de partículas por el método de tamizado

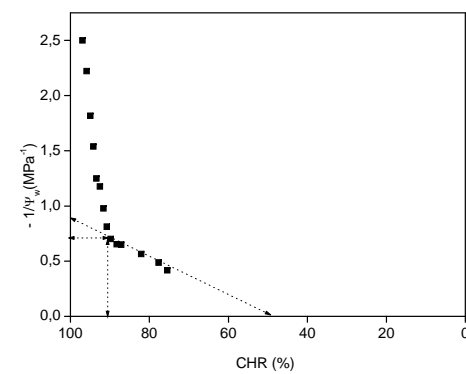
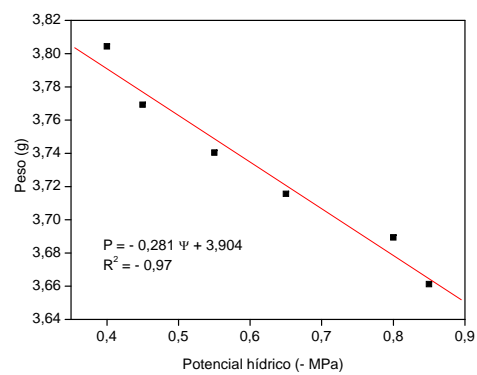
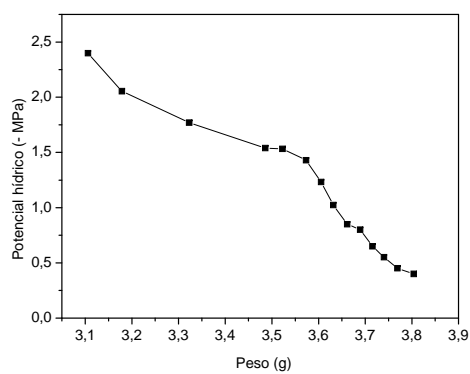




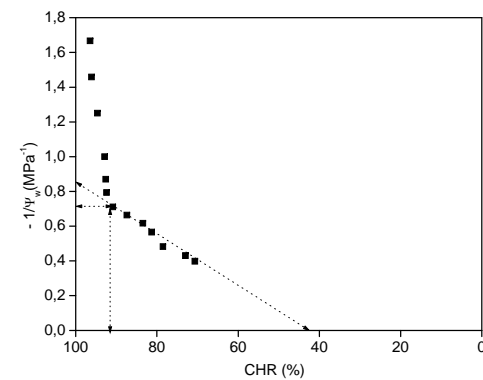
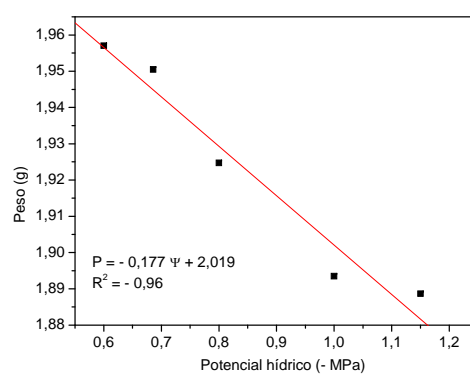
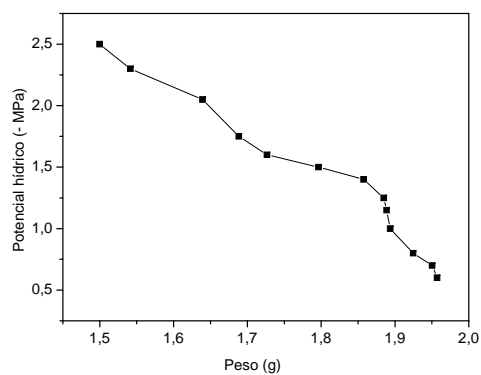
Leyenda: fracción tamizada en los tamices (X_i), fracción retenida en los tamices (Y_i). La intercepción entre las dos curvas corresponde al diámetro medio de las partículas.

Anexo 2. Comportamiento de los datos obtenidos para la construcción de las curvas presión-volumen (CPV), a partir de las pesadas y medidas de potencial hídrico.

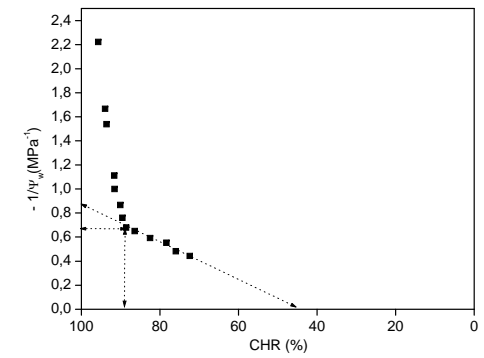
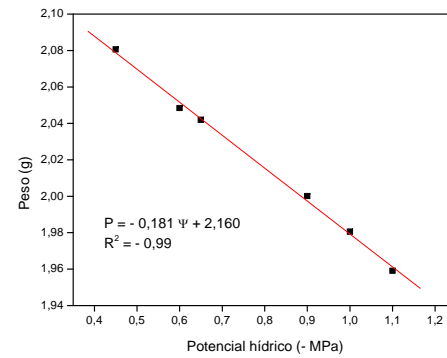
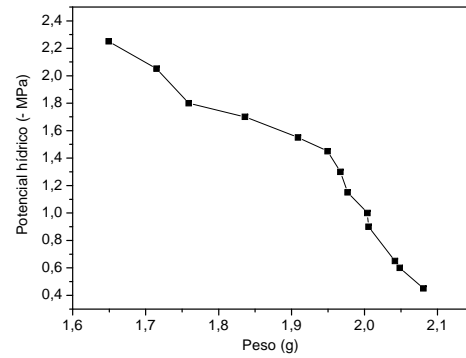
BC1



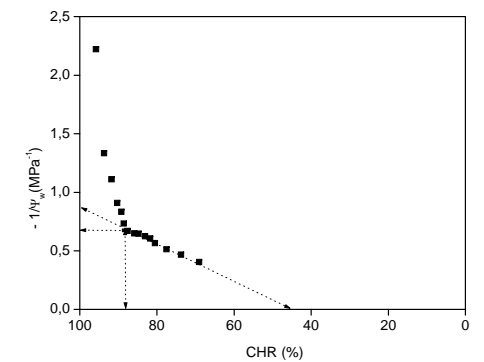
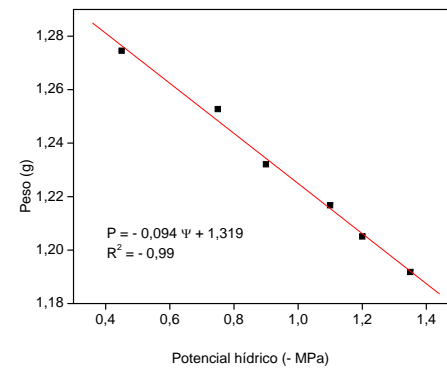
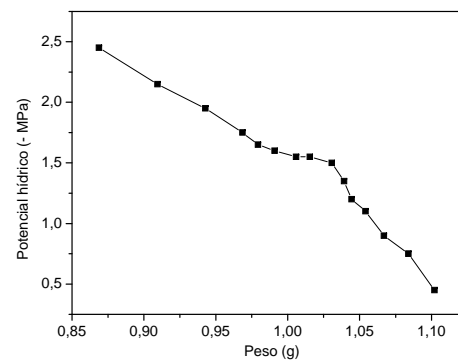
BC2



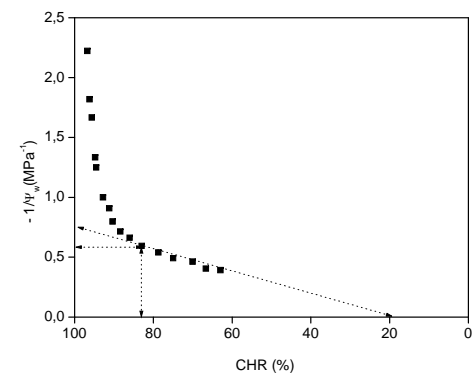
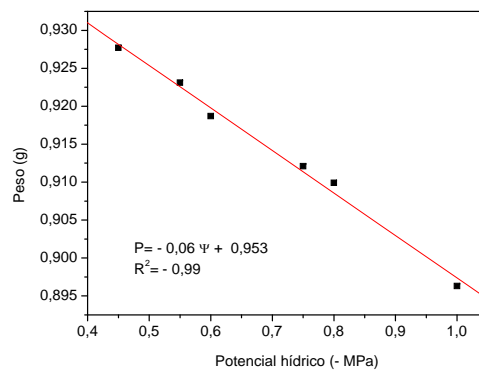
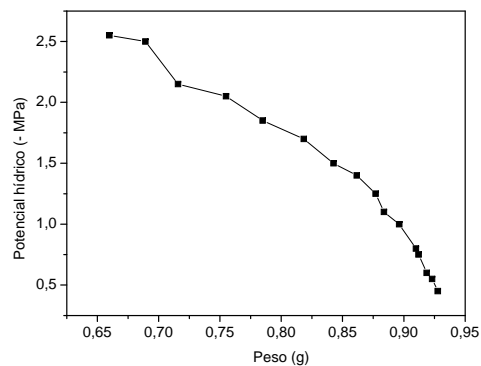
BC3



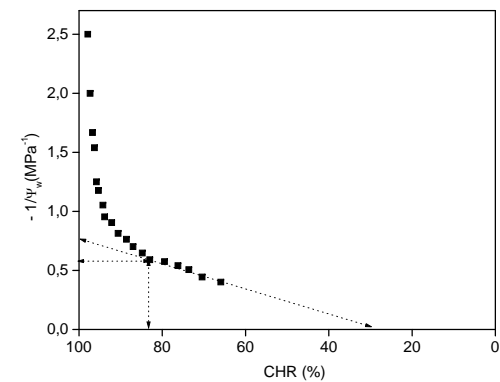
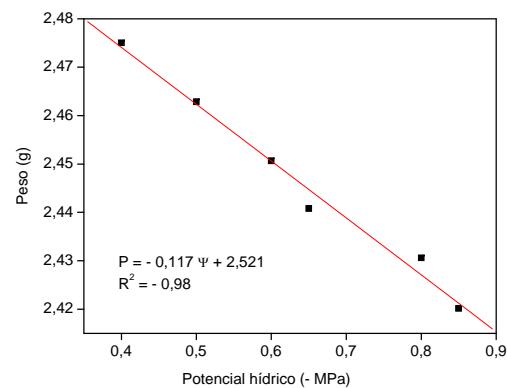
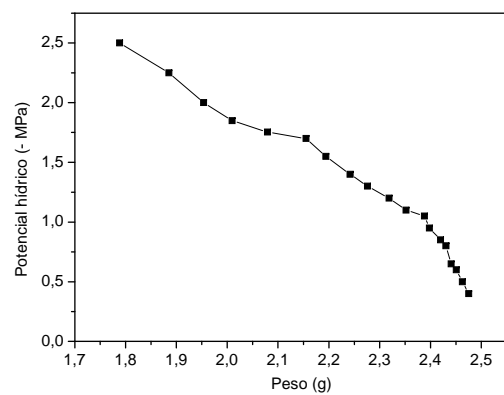
BC4



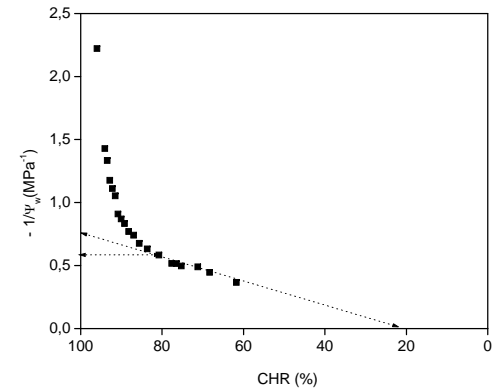
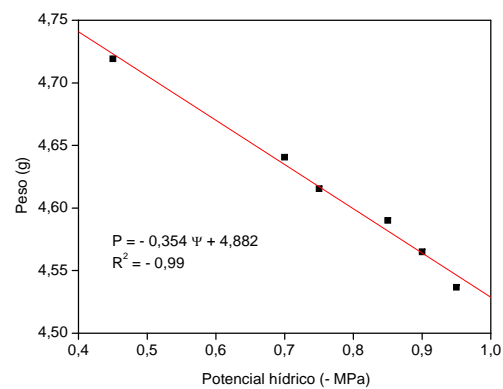
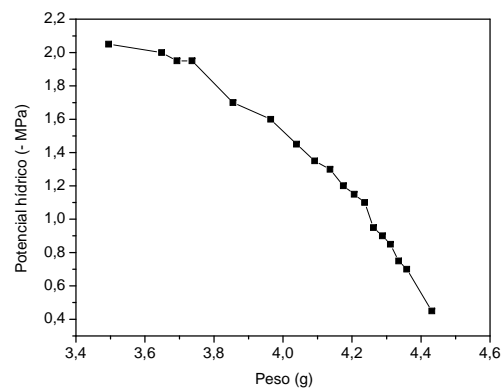
T1



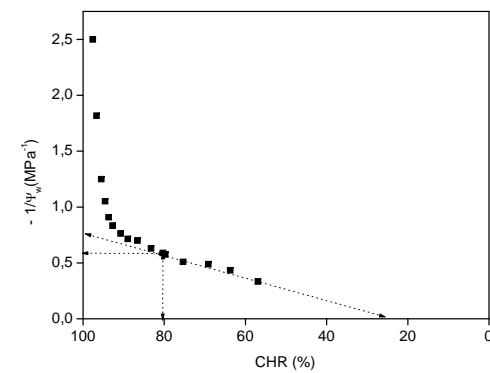
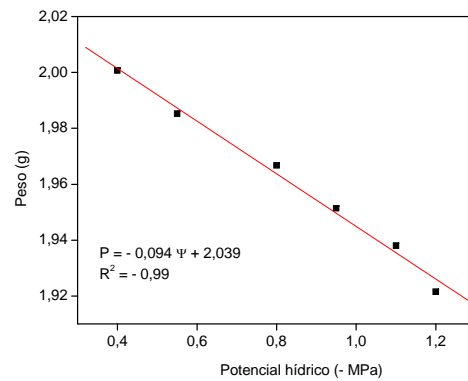
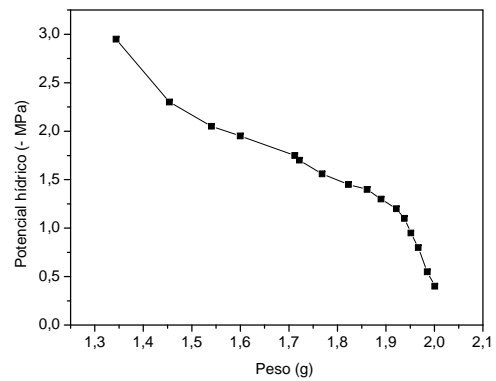
T2



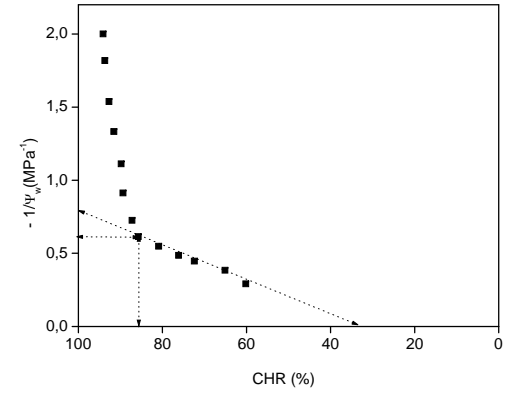
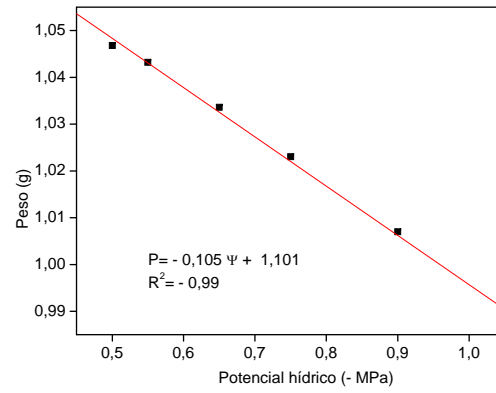
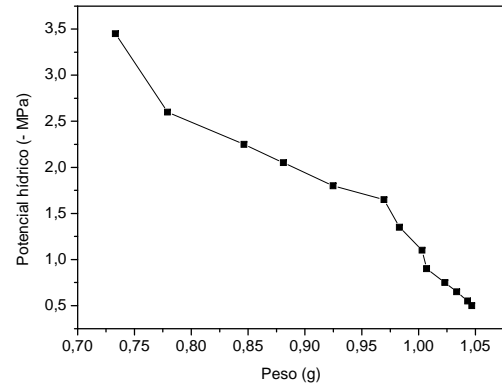
T3



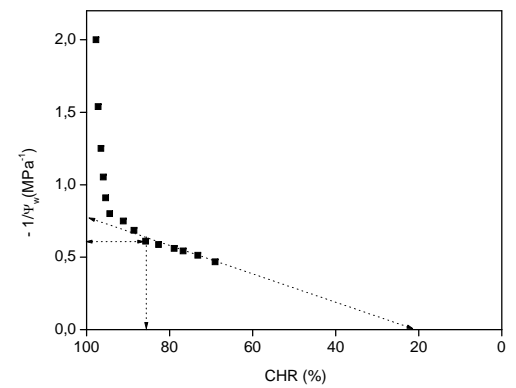
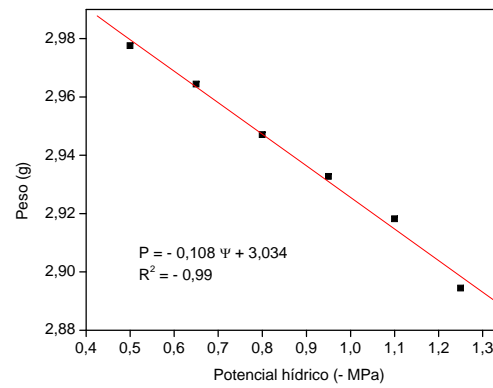
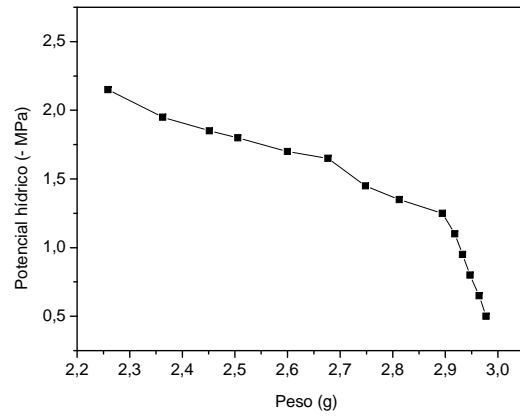
T4



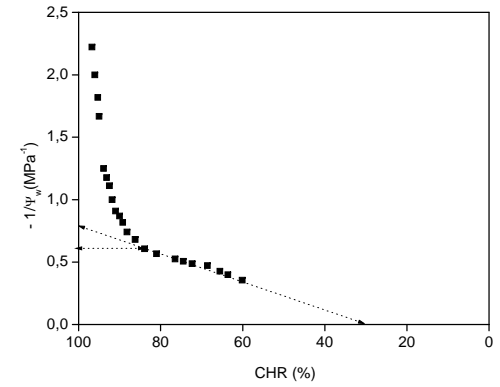
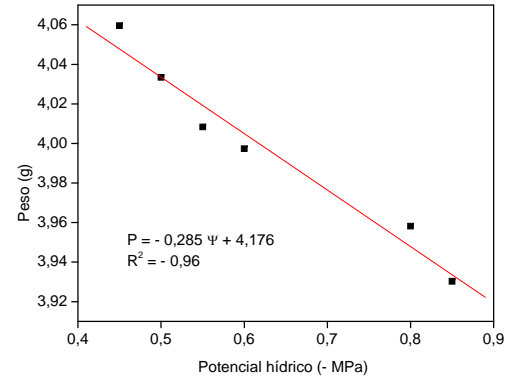
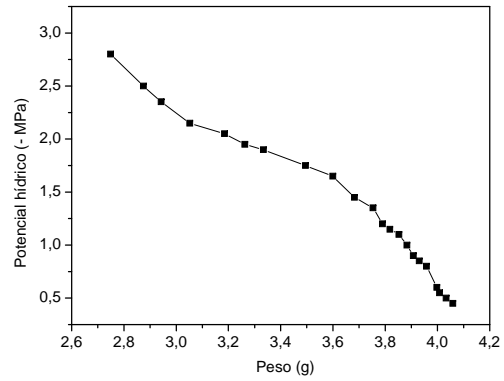
C1



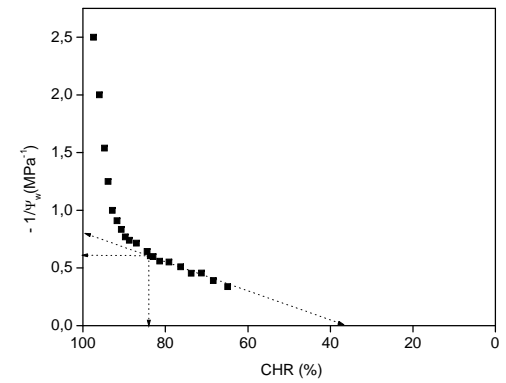
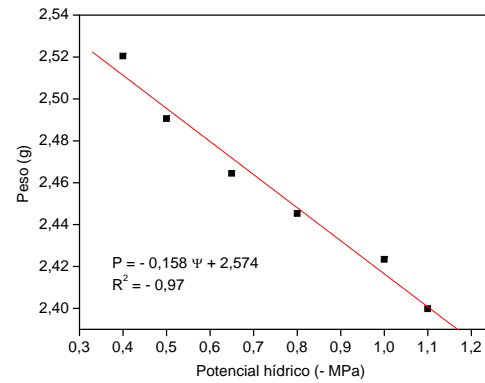
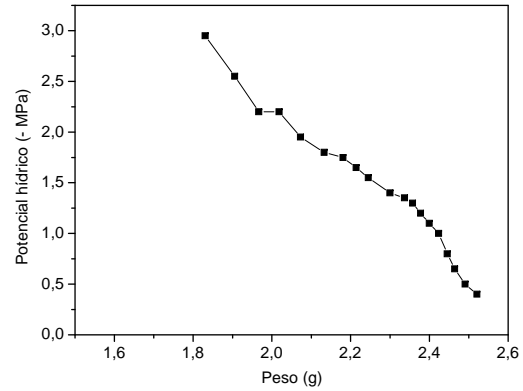
C2



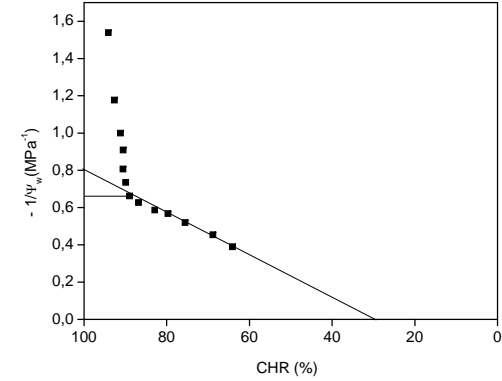
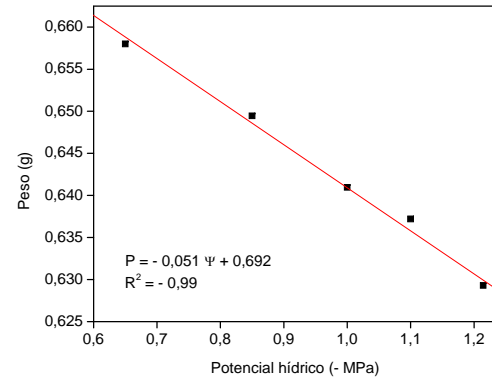
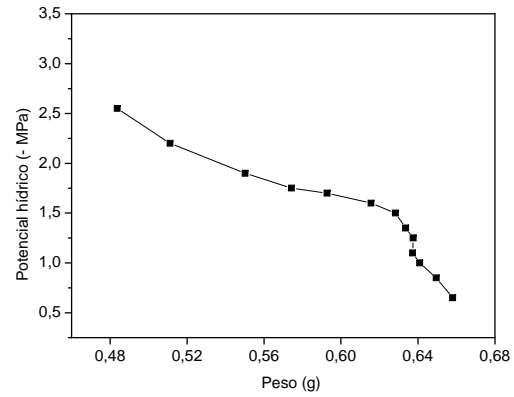
C3



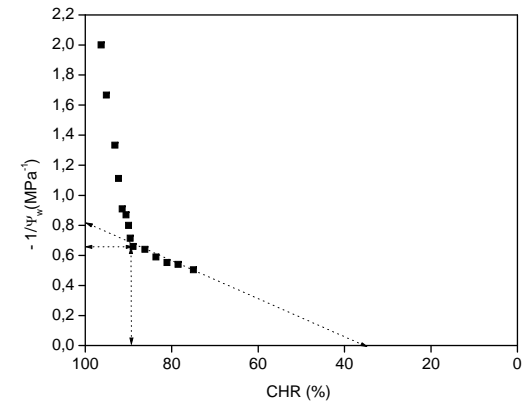
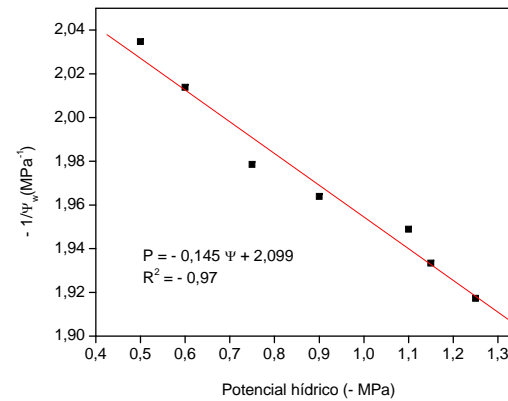
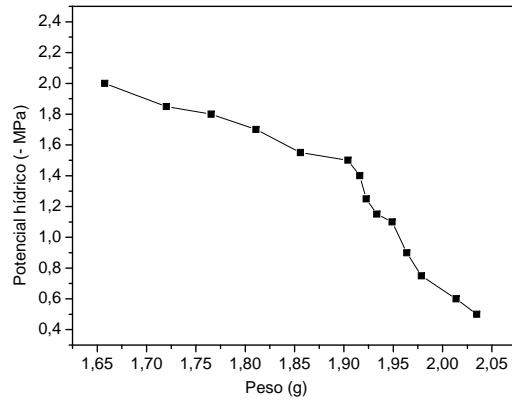
C4



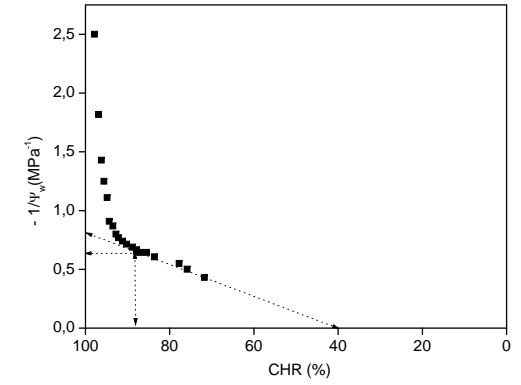
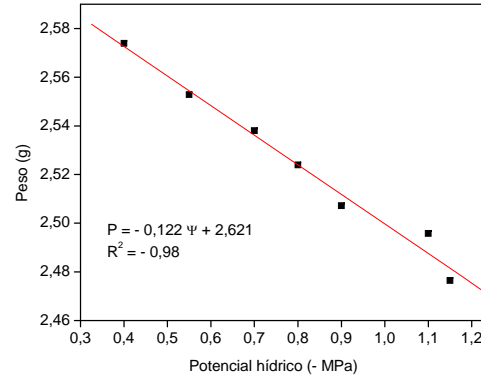
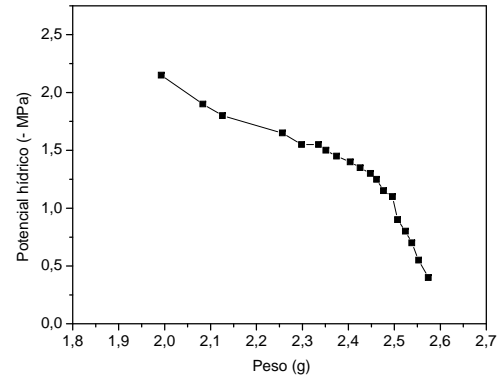
C201



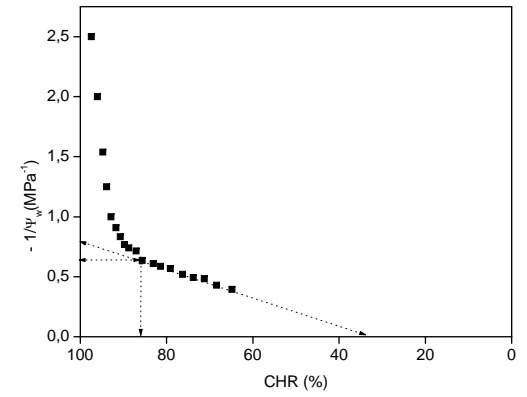
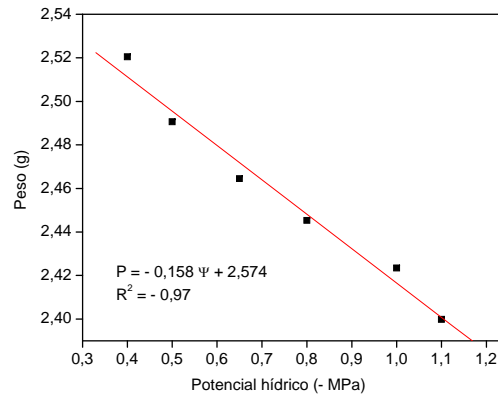
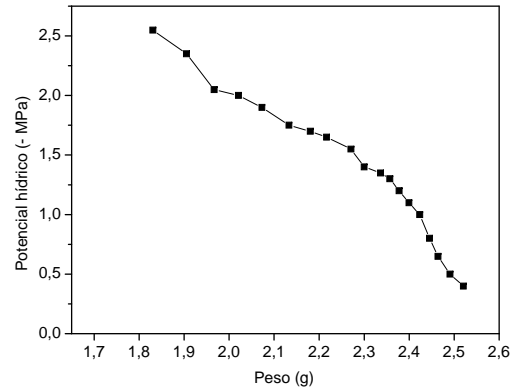
C202



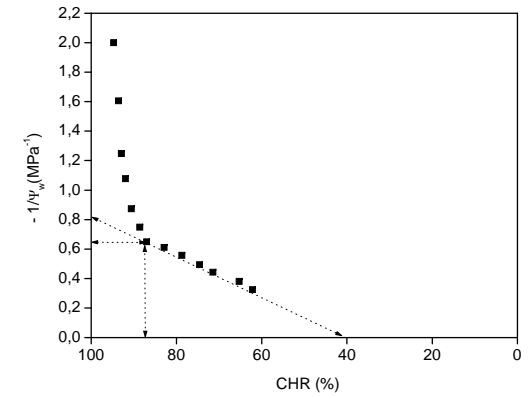
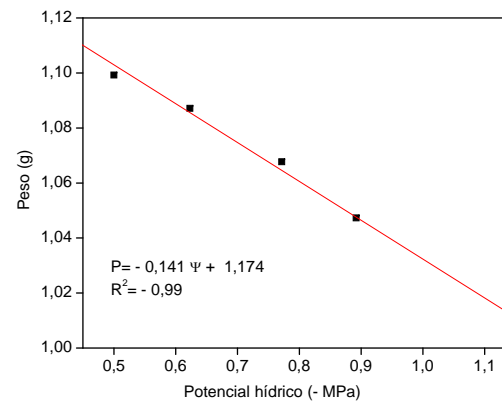
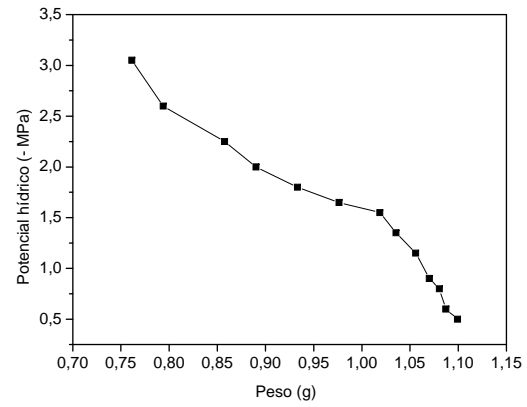
C203



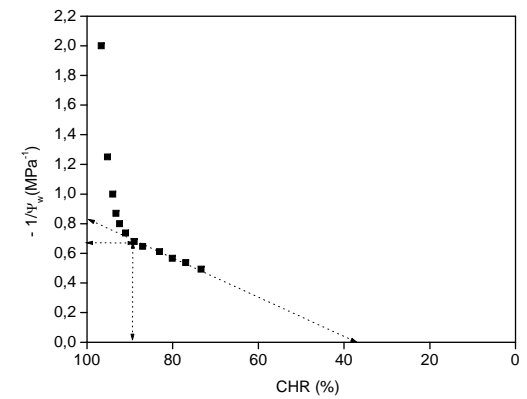
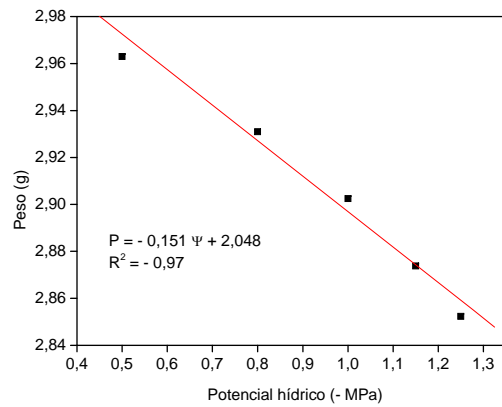
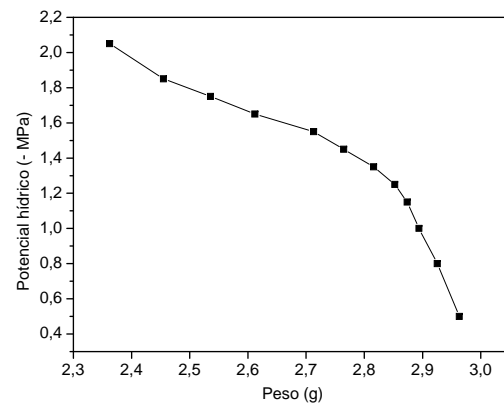
C204



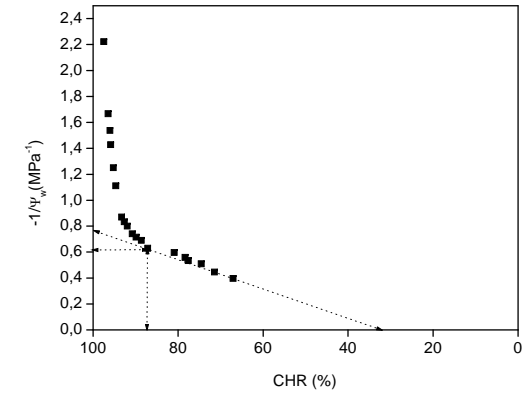
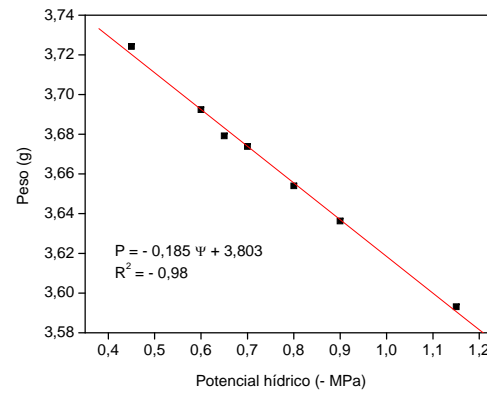
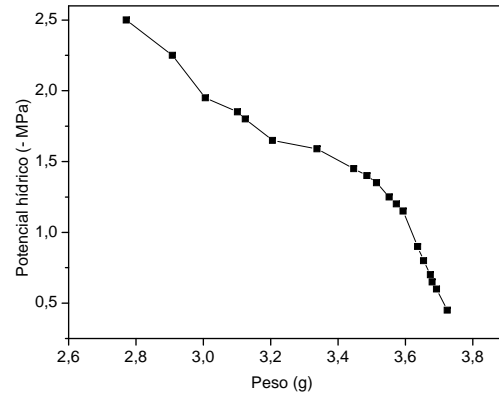
C501



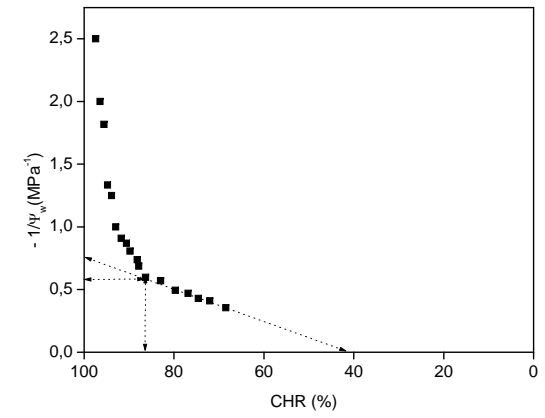
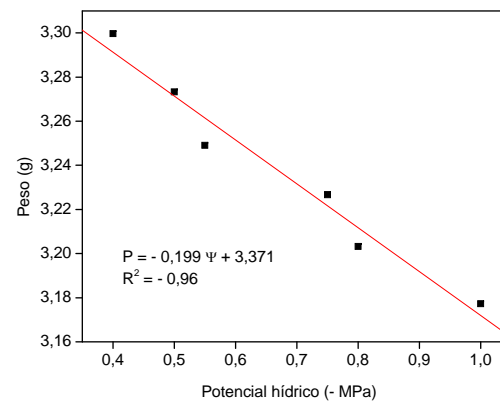
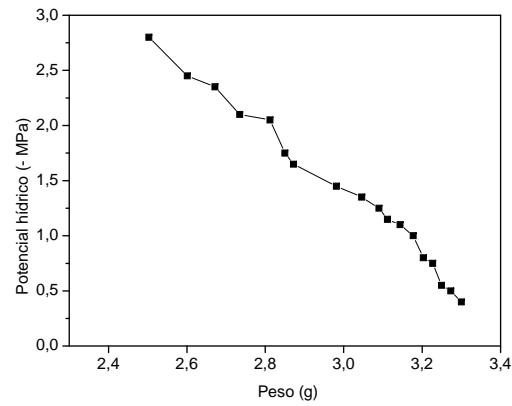
C502



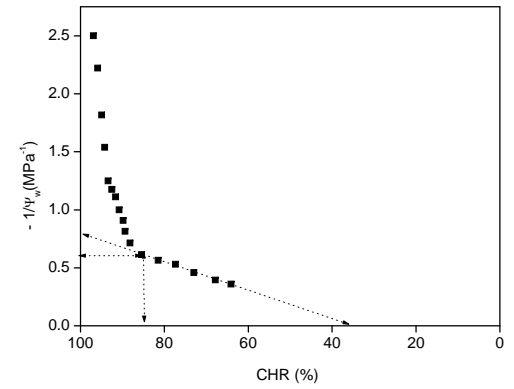
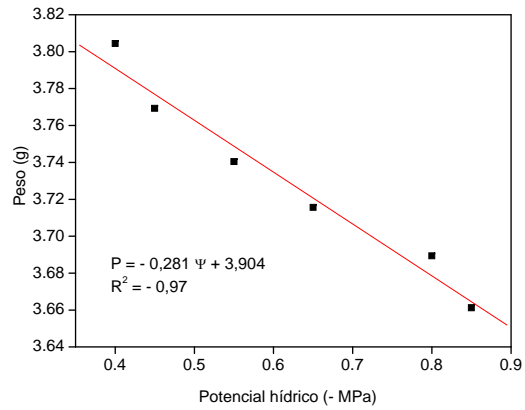
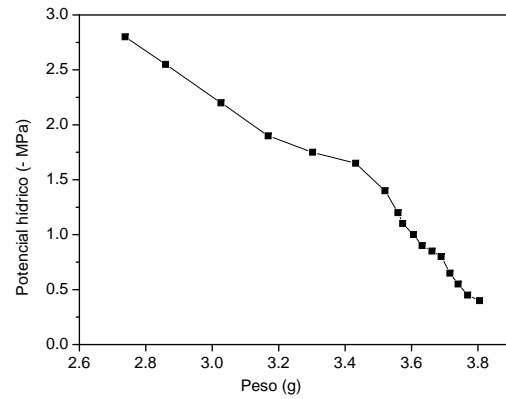
C503



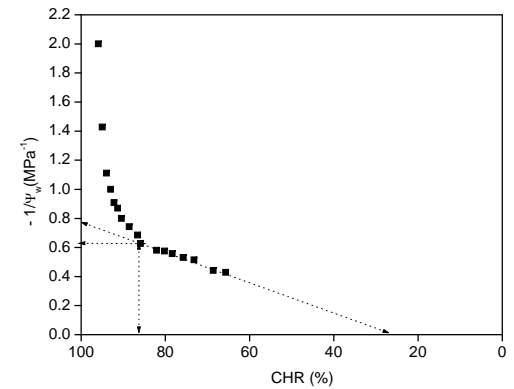
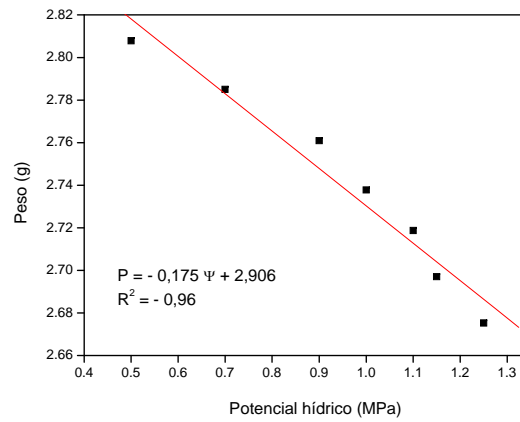
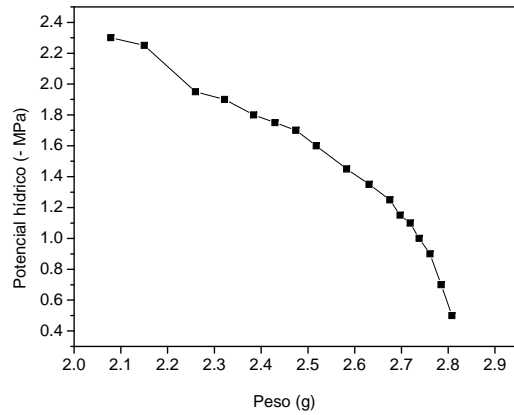
C504



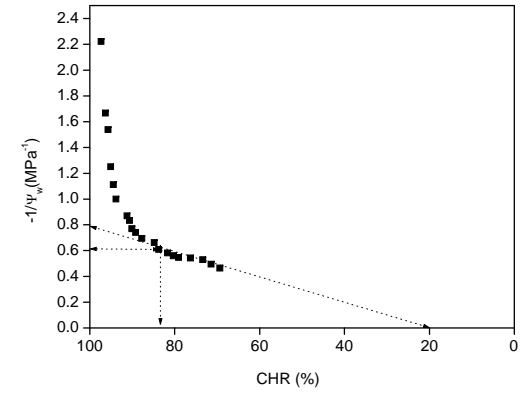
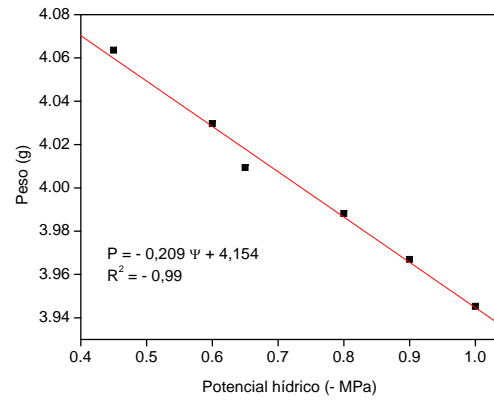
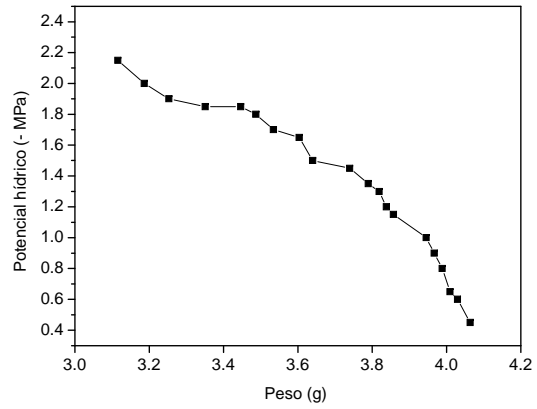
C801



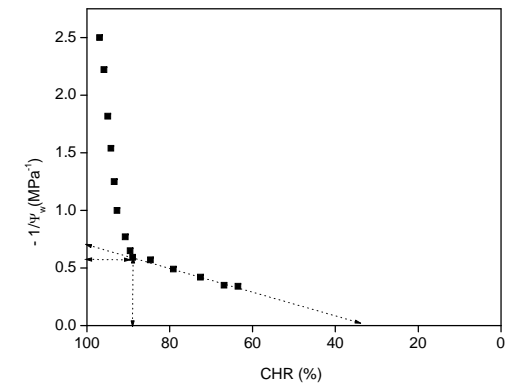
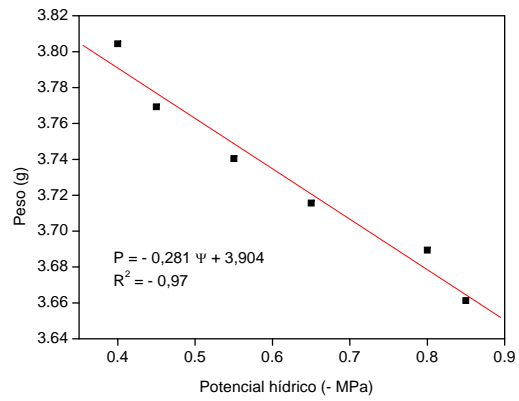
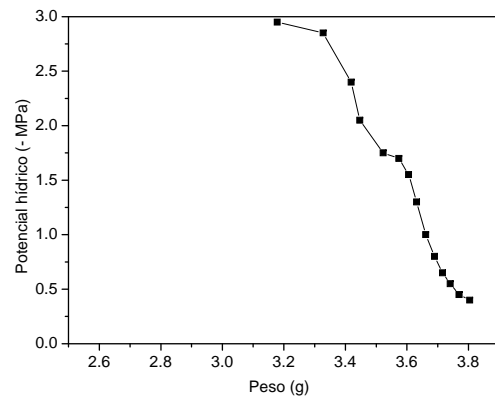
C802



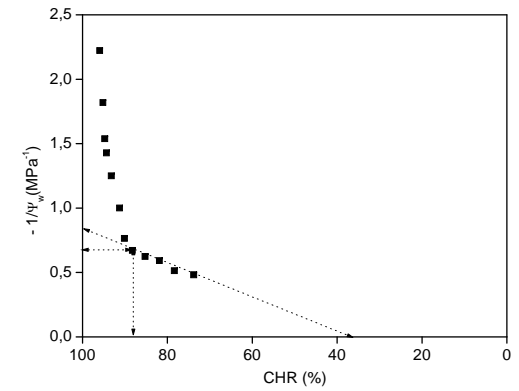
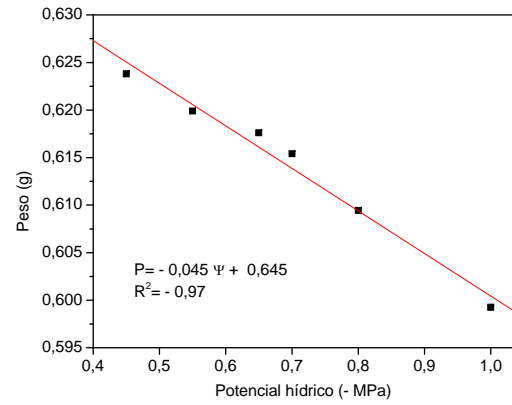
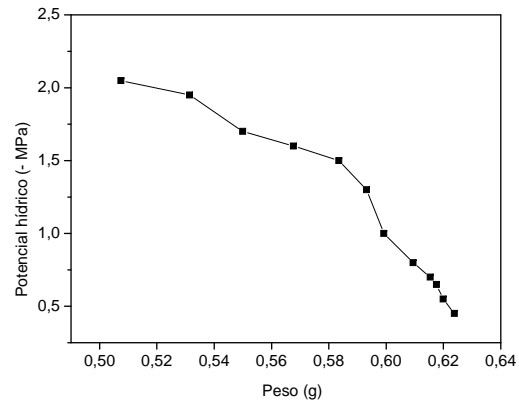
C803



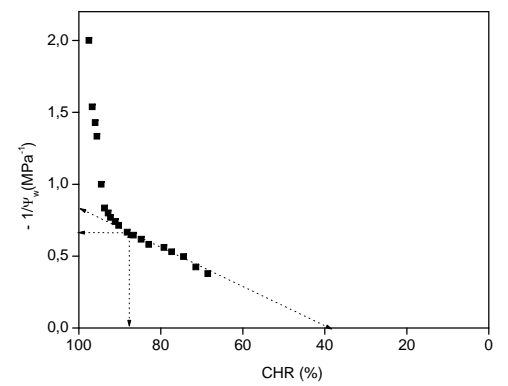
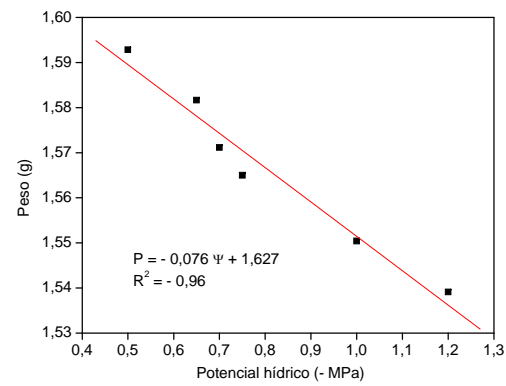
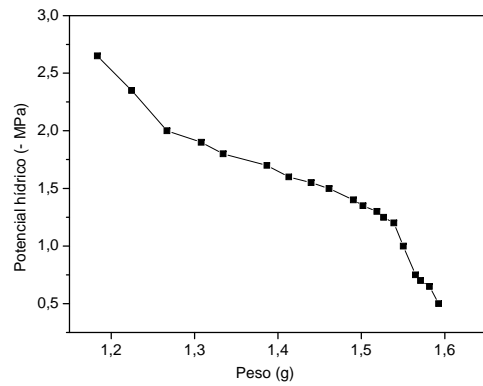
C804



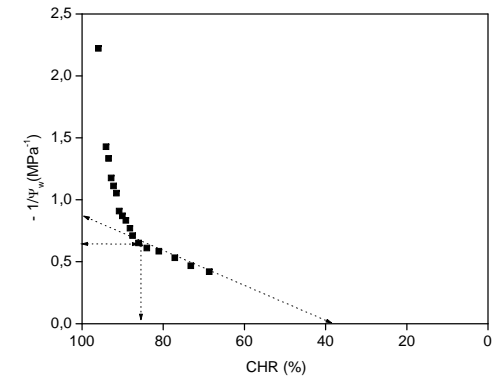
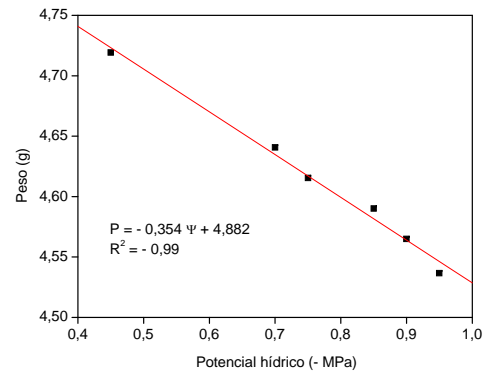
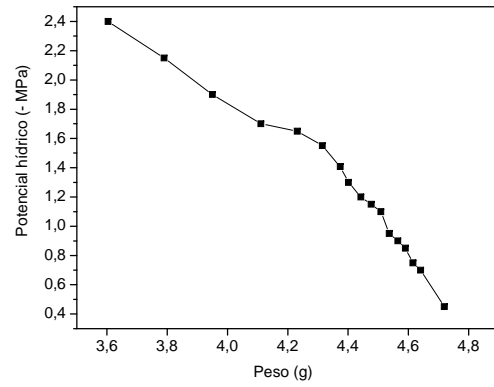
T201



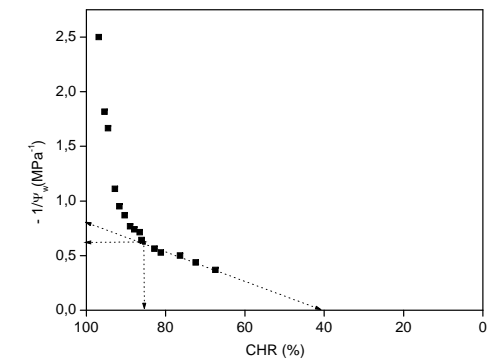
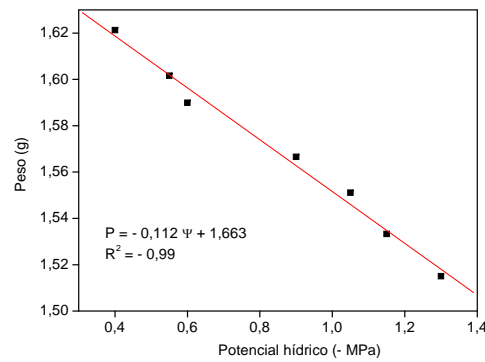
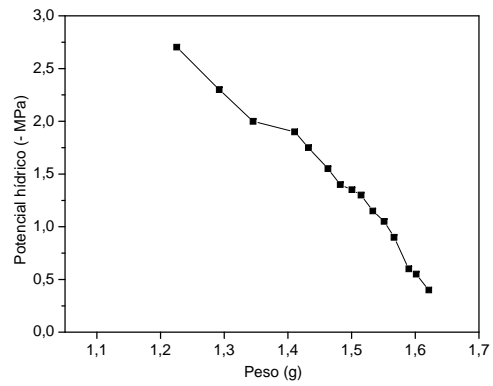
T202



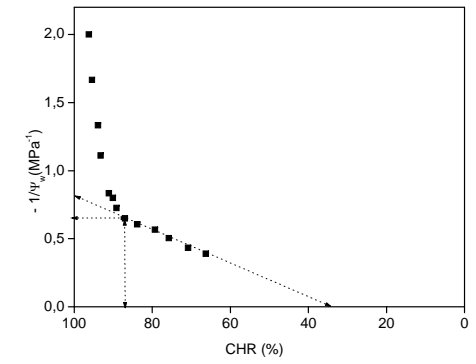
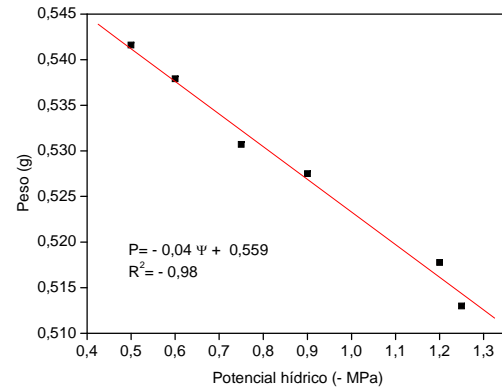
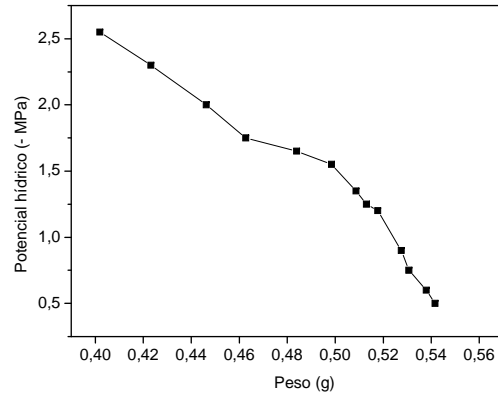
T203



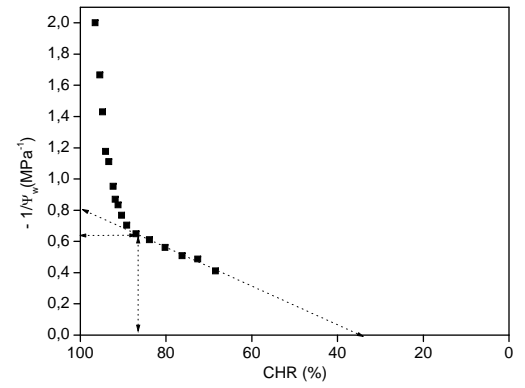
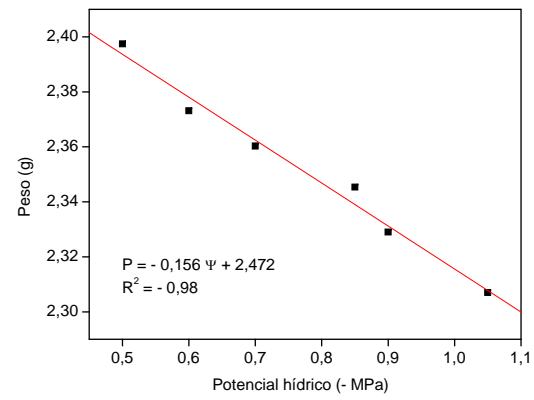
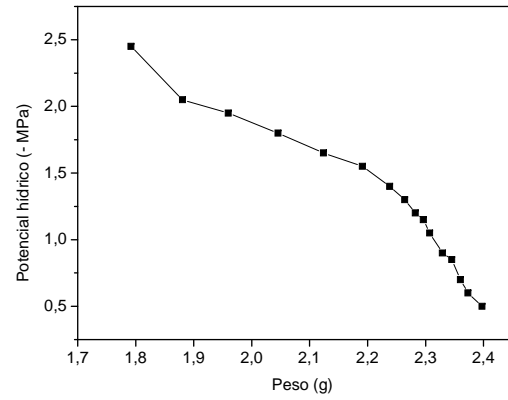
T204



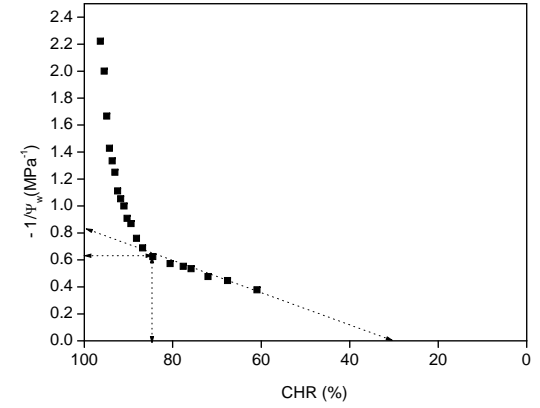
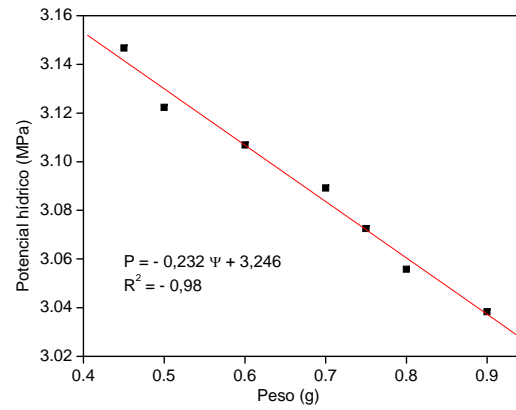
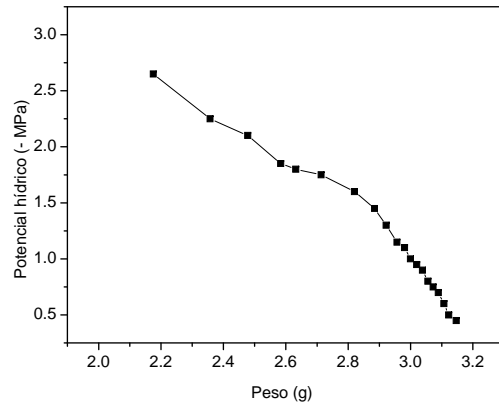
T501



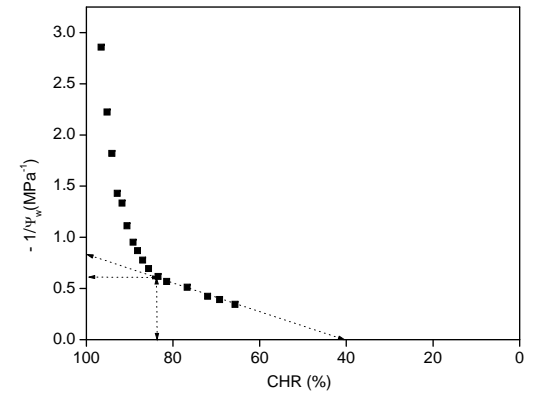
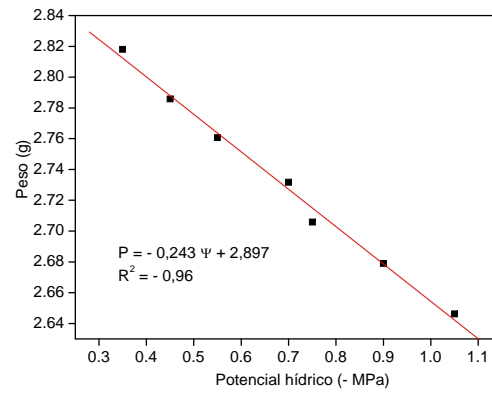
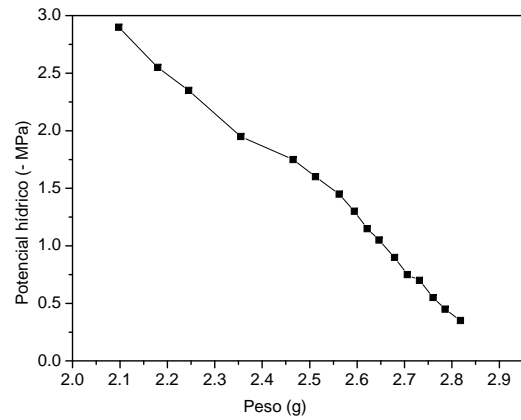
T502



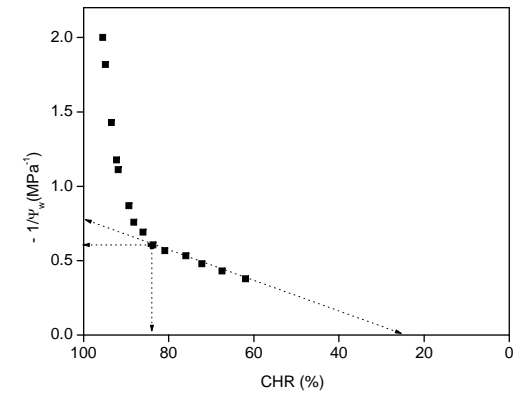
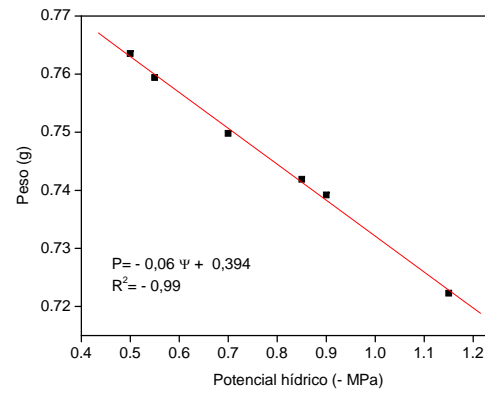
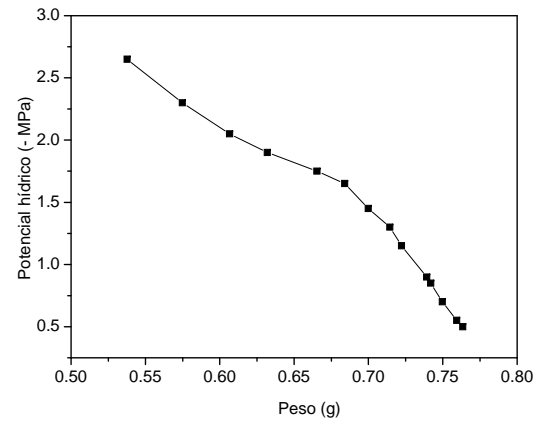
T503



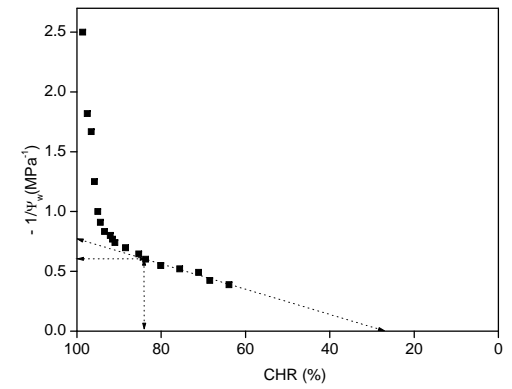
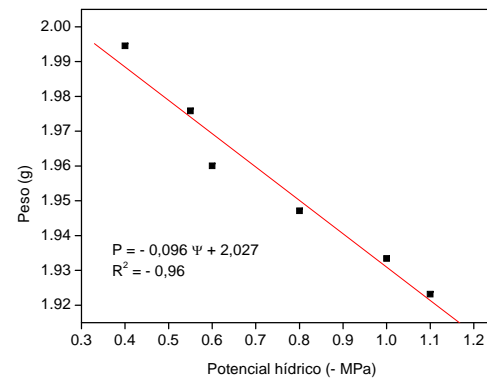
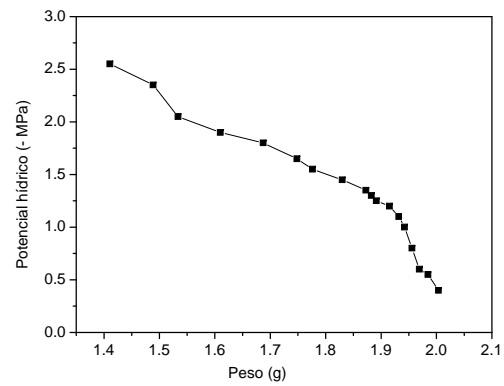
T504



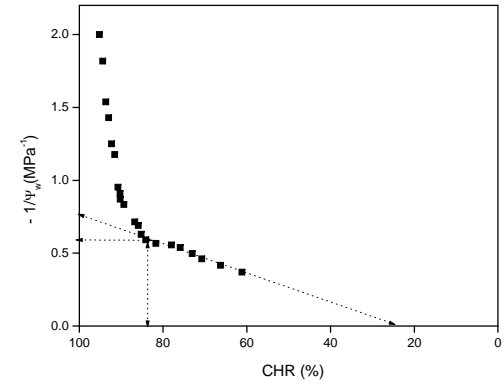
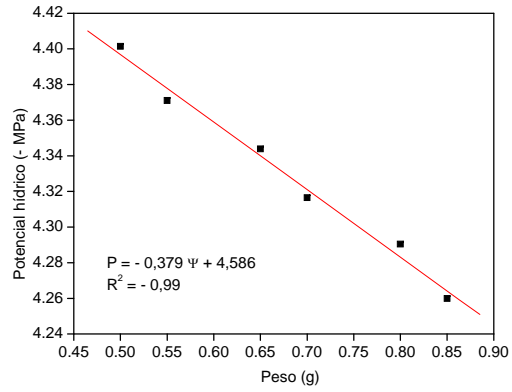
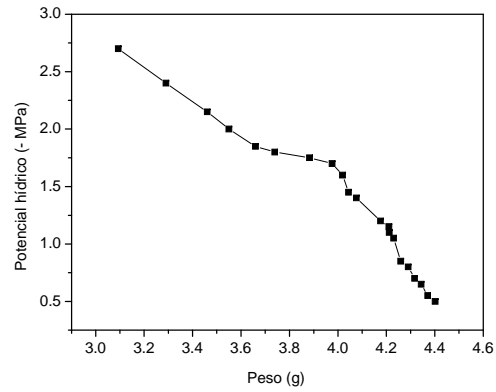
T801



T802



T803



T804

